



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

SPOLEHLIVOST PÁJENÝCH SPOJŮ LED PANELŮ

RELIABILITY OF LED PANELS SOLDER JOINTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Šimon

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Vojtěch Šimon

ID: 154886

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Spolehlivost pájených spojů LED panelů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte odbornou literaturu z oblasti pájení přetavením. Podrobněji se zaměřte na vliv integrálu teploty a času pájení na pájený spoj. Uveďte některé aspekty pájení pájecí pastou na bázi SAC 305 a SnBi.

Nastavte a proměřte teplotní profily pro 2 rozdílné integrály teploty a času pájení v mezích tolerance hodnot stanovených výrobcem pájecí pasty pro LED panel.

Vyhodnoťte u LED panelů vzhled spoje vizuálně pomocí mikroskopu a rentgenu.

Sledujte pevnost spoje v relaci s výskytem dutin i tloušťkou IMC.

Proveďte mikrovýbrus spoje (opticky a pomocí SEM), určete tloušťku IMC vrstvy.

Sledujte oteplení panelu během izotermálního zrychleného stárnutí.

Výsledky graficky zpracujte a diskutujte vliv materiálu i teplotních procesů na spolehlivost pájeného spoje.

Spolupráce s firmou Osmont Jihlava

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem dodané teploty a použité pájky na kvalitu pájeného spoje. V teoretické části práce je řešena technologie pájení přetavením, problematika výběru pájecí pasty či kritéria pro nastavení pájecího profilu. Praktická část je věnována měření a návrhu teplotního profilu. Důraz je kladen zejména na analýzu SnBi pájecí pasty a její kompatibilitu s konvenčním vybavením, což je oblast, která doposud není uspokojivě probádána. K vyhodnocení získaných výsledků je použita analýza rentgenovou tomografií, metalografickým mikroskopem a elektronovým mikroskopem. Dále je hodnocena mechanická odolnost spoje, kterou prokazují odtrhové zkoušky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pájení, LED, rentgen, pájecí pasta, návrh teplotního profilu, integrál teploty, defekt, void, kvalita spoje, spolehlivost, pevnost, bismut, elektronová mikroskopie

ABSTRACT

Thesis is focused on the effect of heating factor on quality of solder joints. In theoretical part is solved reflow soldering technology, problematics of solder paste choice or criteria of soldering profile setting. The practical part is dedicated to demonstrating the impact of heating factor and solder alloy on solder joint quality. The main part is dedicated to analysis of SnBi solder paste and it's compability with conventional tools and technologies, as this is not very satisfactorily described area. To evaluation of created products are used several methods like X-Ray analysis, microsections and metalographic microscope or electron microscope. To proof mechanical reliability is used tear off test.

KEYWORDS

Soldering, LED, X-Ray, solder paste, heating profile development, heating factor, defect, void, soldering quality, reliability, strength, bismut, electon microscopy

ŠIMON, V. *Spolehlivost pájených spojů LED panelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2017. 79s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Spolehlivost pájených spojů LED panelů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce a návrhu experimentů.

Dále bych chtěl poděkovat společnosti Osmont s.r.o. za poskytnutí tématu diplomové práce, času i prostředků k její realizaci,

společnosti Amtest s.r.o. za věnování pájecí pasty pro realizaci praktické části diplomové práce,

společnostem Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o. a FEI Czech Republic s.r.o. za poskytnutí technického zázemí a odborné vedení.

V neposlední řadě bych rád také poděkoval za korekturu Tereze Šimonové.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace

OBSAH

Úvod	10
1 Pájení přetavením pájecí pasty	11
1.1 Druhy přenosu tepla.....	11
1.1.1 Vedení – kondukce	11
1.1.2 Proudění – konvekce.....	12
1.1.3 Záření – radiace	12
1.2 Technologie pájení přetavením.....	12
1.2.1 Konvekční pájení	13
1.2.2 Pájení infračerveným zářením	15
1.2.3 Kondenzační pájení.....	16
1.2.4 Laserové pájení	17
1.2.5 Ultrazvukové pájení.....	17
2 Pájecí pasta	18
2.1 Složení pájecí pasty	18
2.2 Pájecí slitiny.....	19
2.3 Pájecí slitina SnBi.....	21
2.4 Tavidla	23
3 Faktory ovlivňující kvalitu pájeného spoje	24
3.1 Integrál teploty a času	24
3.2 Vliv intermetalické vrstvy	27
4 Praktická část	29
4.1 SAC pájecí pasta a vliv teplotního profilu.....	29
4.1.1 Procesní okno doporučené výrobcem pasty.....	29
4.1.2 Metodika měření teplotního profilu	31
4.1.3 Profil 1 a dosažené výsledky	34
4.1.4 Profil 2 a dosažené výsledky	36
4.2 SnBi pasta – nastavení a optimalizace teplotního profilu.....	38

4.2.1	Výchozí stav	38
4.2.2	Návrh a optimalizace teplotního profilu SnBi pasty.....	39
5	Analýza a hodnocení dosažených výsledků	45
5.1	Vizuální hodnocení LED panelu po přetavení.....	45
5.2	Rentgenová analýza	45
5.2.1	Rentgenové snímky SAC 1. generace.....	46
5.2.2	Rentgenové snímky SAC 2. generace.....	47
5.2.3	Rentgenové snímky SnBi.....	49
5.2.4	Diskuze výsledků.....	50
5.3	Odrhové zkoušky	51
5.4	Mikrovýbrus.....	53
5.4.1	Tvorba mikrovýbrusu	53
5.4.2	Vizuální hodnocení mikrovýbrusů optickým mikroskopem	54
5.4.3	Diskuze výsledků.....	57
5.5	Analýza mikrovýbrusu pomocí elektronového mikroskopu.....	58
5.5.1	Elektronová mikroskopie	58
5.5.2	Příprava vzorků.....	60
5.5.3	Použitá zařízení.....	61
5.5.4	Snímky z elektronového mikroskopu	63
5.5.5	Diskuze výsledků.....	70
5.6	Oteplení panelu během izotermálního zrychleného stárnutí.....	70
6	Závěr	72
	Bibliografie	74
	Seznam obrázků	76
	Seznam tabulek	78
	Seznam zkratk	79
	Obrazová příloha	79

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá studiem vlivu typu pájecí slitiny a pájecího profilu na spolehlivost pájeného spoje. Ke studiu jsou použity desky plošných spojů osazené LED diodami, které poskytla společnost Osmont s.r.o.

Práce vznikla v souvislosti s požadavkem společnosti prozkoumat, zda lze pro výrobu LED panelů použít SnBi pájecí pastu s nižší teplotou tavení a jak se tento krok projeví na výsledné kvalitě. Náplní práce tak je zajistit komplexní analýzu s co možná nejvíce platnými závěry a doporučeními pro další vývoj směřující k vyšší kvalitě celého sestavení. Cílem práce je tedy poskytnout technologický postup pájení LED panelů, který povede ke zvýšení jakosti.

Teoretická část práce se zabývá studiem metody pájení přetavením a všemi jevy, které tuto metodu provází. Součástí jsou informace, které jsou podstatné pro správné navržení technologického postupu včetně teplotního profilu.

V rámci praktické části jsou využívány rozličné metody ověření kvality spoje, jako je rentgenová tomografie, optická a elektronová mikroskopie a s ní související výroba mikrovýbrusu, odtrhový test či samotná metodika návrhu teplotního profilu pro konkrétní přetavovací pec a pájecí pastu. Aby byl čtenář schopen tento postup replikovat, je vždy u příslušné kapitoly uveden úvod do metody, rozhraní přístroje a postup, jakým bylo výsledku dosaženo.

Závěry jsou vyhodnocovány vzhledem k platné normě IPC-A-610 F, nejnovějšímu vydání. Tato norma je zmiňována v celé práci a je brána jako reference.

Následně je zpracováno porovnání SnBi pájecí pasty s konvenční SAC pastou a komentář s doporučením dalšího postupu.

1 PÁJENÍ PŘETAVENÍM PÁJECÍ PASTY

Pájení přetavením, nebo také reflow pájení, je souhrnné označení pro několik zcela odlišných způsobů pájení, které mají společnou podstatu, tedy, že definované množství nanesené pájecí pasty přetavíme působením teploty vyšší, než je teplota tání pájecí slitiny. Tím se liší od pájení vlnou či ručního pájení, kde není možné mít proces dávkování pájky a tavidla zcela pod kontrolou.

Charakteristická pro pájení přetavením je také schopnost SMD komponent vycentrovat se vlivem povrchového napětí. Tuto vlastnost je třeba vidět dvěma pohledy. Na rozdíl od pájení vlnou, kde jsou komponenty k DPS přilepeny, je zde možná autokorekce v průběhu procesu přetavení. Z pohledu kvality a zejména řízení rizik je však třeba brát v potaz, že stejně tak správně osazená deska může být z různých důvodů zapájena špatně, pokud není povrchové napětí takové, jaké jsme si ho představovali, například předčasnou či pozdní aktivací tavidla.

Pájení přetavením zahrnuje metody vhodné k pájení samostatných součástek až po přetavení celých sestavení. Nejzákladnější dělení metod je dle druhu přenosu tepla na pájecí pastu.

1.1 Druhy přenosu tepla

1.1.1 Vedení – kondukce

Vedení neboli kondukce je jev, při kterém částice teplejší látky předávají část své energie částicím látky chladnější, se kterou jsou v přímém fyzickém kontaktu. Míra pohybu částic, a tedy i míra, s jakou je energie předávána, je charakteristická pro každou látku a probíhá ve všech skupenstvích. Tento jev je popsán vztahem

$$q = \frac{\lambda \cdot S \cdot \Delta T}{L}, \quad (1.1)$$

kde q vyjadřuje tepelný tok (W), λ je tepelná vodivost materiálu ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), S je plocha, kterou teplo prochází (m^2) a $\frac{\Delta T}{L}$ je teplotní gradient v (Km^{-1})

Také si lze všimnout určité analogie s Ohmovým zákonem: q – proud, ΔT – rozdíl napětí, $L/\lambda S$ odpor.

Metodou vedení se nejčastěji realizuje přenos tepla z pouzdra komponenty na desku, k níž je připevněn. Tato metoda vyžaduje vysokou tepelnou vodivost, což splňují například desky s kovovým jádrem či keramické substráty. [1]

1.1.2 Proudění – konvekce

Zatímco vedení probíhá ve všech látkových skupenstvích, proudění probíhá pouze v kapalinách a plynech. Důležitým rozdílem je, že vedení je neuspořádaným pohybem jednotlivých molekul, zatímco na přenosu prouděním se podílí všechny molekuly v daném systému. Přenos je tedy mnohem více intenzivní. Z hlediska zdroje proudění rozlišujeme proudění přirozené, které je dáno vlivem gravitačních sil na molekuly, jež mají při různých teplotách různou hmotnost. Nejsnáze lze tento jev popsat na vzduchu, který se vzrůstající teplotou ztrácí na hustotě a stoupá samovolně vzhůru.

Oproti přirozenému proudění existuje nucené, které se využívá pro intenzivnější přenos tepla a je realizováno ventilátory či čerpadly. Přenos tepla je dán vztahem

$$q^c = h^c \cdot S \cdot (T_s - T_a), \quad (1.2)$$

kde q^c vyjadřuje přenos tepla prouděním (W), h^c je koeficient konvekčního přenosu tepla ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), S je plocha (m^2), na kterou konvekce působí a $T_s - T_a$ je rozdíl teplot na povrchu a okolí (K). [1]

1.1.3 Záření – radiace

Přenos tepla zářením je z fyzikálního hlediska přeměna energie radiátoru na elektromagnetické vlnění v různých frekvenčních spektrech, přičemž pro přenos tepla se používá pás infračerveného záření. Přenos tepla lze popsat vztahem

$$q = \varepsilon \cdot k \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (1.3)$$

kde q vyjadřuje množství tepelné energie přenesené zářením, ε je koeficient vyzařování, k je Stefan-Boltzmannova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) a $T_1^4 - T_2^4$ je rozdíl teplot na zářiči a cílovém místě. [1]

1.2 Technologie pájení přetavením

Pájení přetavením můžeme rozdělit na pět základních metod:

- konvekční pájení
- pájením infraohřevem
- kondenzační pájení
- laserové pájení
- kontaktní pájení

Dříve, než budou uvedeny jednotlivé metody, si řekněme něco o výhodách, které jsou společné pro všechny z nich.

1. Absence teplotních šoků, díky čemuž je metoda šetrnější pro desku i komponenty. Díky přesně definovanému profilu ohřevu je teplota zvyšována postupně a materiály mají možnost se na změny adaptovat.
2. Možnost vyrábět menší, a přesto složitější sestavy s velmi hustým výskytem SMD komponent. Toho je docíleno zejména přesnými metodami nanášení pájecí pasty.
3. Možnost aplikace pasty pouze lokálně, na rozdíl od pájení vlnou, kde je pájce vystavena celá spodní strana desky. Tím se šetří jak pasta samotná, která je s vyšším podílem vzácných kovů stále dražší, tak je i možné upravit podíl pájky a tavidla dle procesních a technologických potřeb konkrétní aplikace.
4. Širší možnosti úprav pro výrobu menších objemů, avšak je možné s menšími náklady plně automatizovat i malosériovou výrobu.
5. Ve většině kroků je deska s komponenty oddělena od zdrojů nečistot, díky čemuž je výsledný proces spolehlivější a méně poruchový. [1]

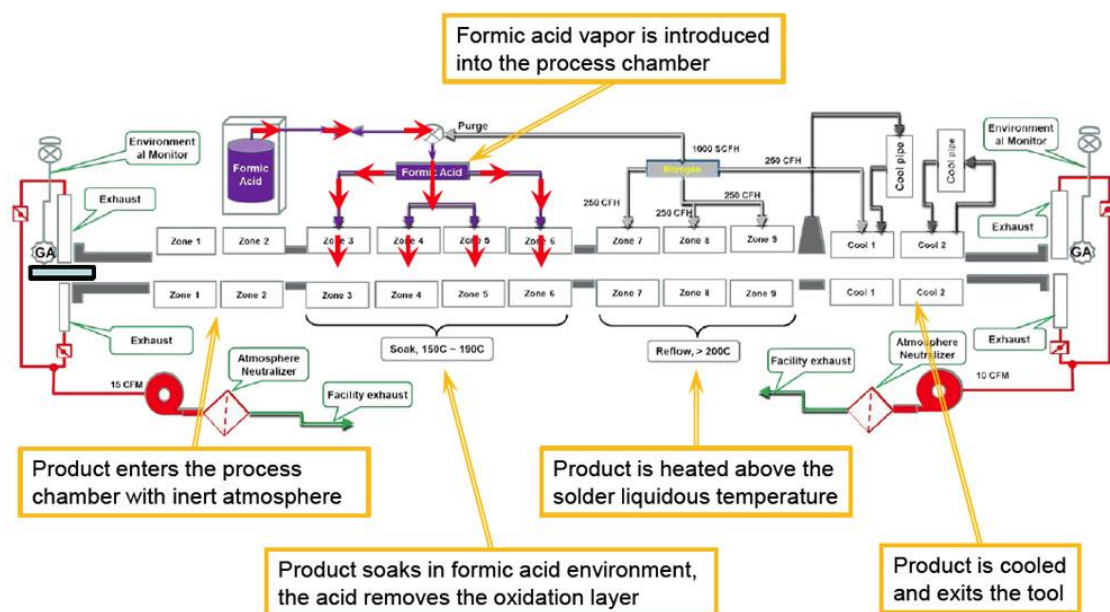
Pro využití výhod konkrétních metod je potřeba vzít v potaz technologii výroby již při návrhu desky. Díky tomu lze předejít mnohým problémům s materiálovou kompatibilitou a zejména teplotní odolností jednotlivých komponent.

1.2.1 Konvekční pájení

Konvekční metoda pájení využívá technologii průchozích pecí, ve kterých dochází k nucenému oběhu média, kterým je nejčastěji atmosféra dusíku, ale stále více se objevují produkty se speciálními atmosférami pro jednotlivé funkční zóny. Cílem je snížit obsah kyslíku v médiu, neboť ten je zdrojem nežádoucích oxidačních procesů. Takový postup pak umožňuje lépe regulovat teplotní profil a také je možné používat méně agresivní tavidla.

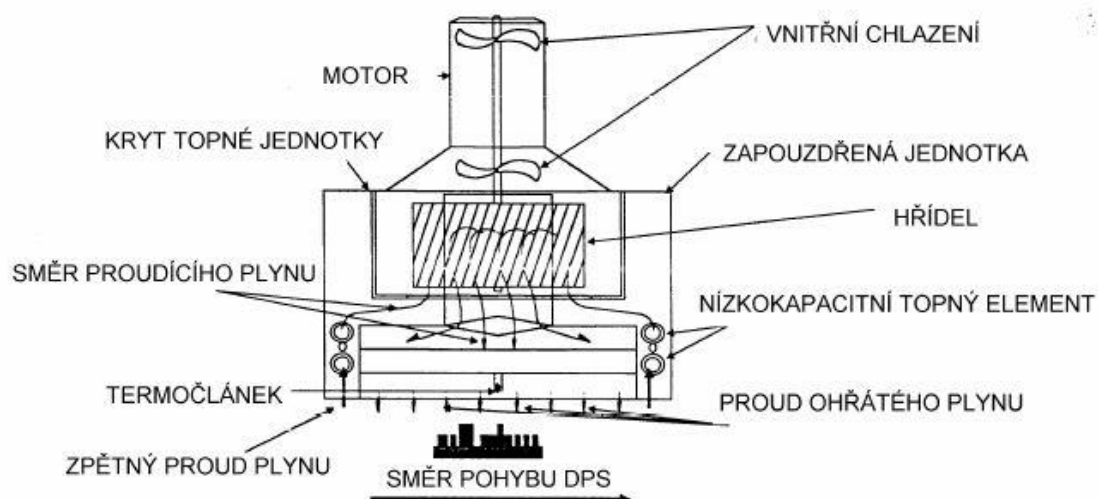
Pec je rozdělena do několika zón, které pak odpovídají teplotním zónám nastaveným v teplotním profilu. Více zón znamená širší možnosti nastavení profilu, ale také vyšší náklady, jak pořizovací, tak i provozní, zejména na energii.

Každá zóna má pak v ideálním případě izolovaný proud proudícího média, které je průběžně ohříváno topnými jednotkami a po ochlazení nasáno zpět k jednotkám pro opětovný ohřev. Schéma moderní pece je na obrázku 1.[2]



Obr. 1 Schéma konvekční pece Heller [2]

Na obrázku vidíme 11 zón seskupených do jednotlivých úseků odpovídajících pájecímu profilu. Vidíme, že pec využívá rozdílných vlastností několika různých atmosfér. Tato pec značky Heller je přizpůsobena pro minimalizaci oxidačních vlivů během pájení. Zejména pro zamezení kontaminaci jednotlivých médií, ale i jako prevence narušení teplotních profilů, je důležité zabránit podélnému proudění mezi jednotlivými zónami, využíváme pouze příčného proudu média. Tato pec je použitelná i jako flux free, tedy bez aplikace tavidla. Na obrázku 2 lze vidět detail topné jednotky. [2]



Obr. 2 Schématické znázornění topné jednotky konvekční reflow pece [1]

Mezi největší výhody konvekčních pecí patří šetrnost k vícevrstevným deskám a široké spektrum režimů pro nastavení pájecích profilů nejen teplotami, ale i rychlostí posuvníku či volbou atmosféry. Vyšší modely jsou vhodné pro pájení prakticky jakýchkoliv sestav včetně BGA či stále rozšiřenějších flip chipů.

Naopak nevýhodou je nižší účinnost procesu související s vyššími ztrátami v průběhu proudění. V případě levnějších pecí, které využívají jako přenosové médium vzduch, také dochází k výrazným oxidačním vlivům. [1]

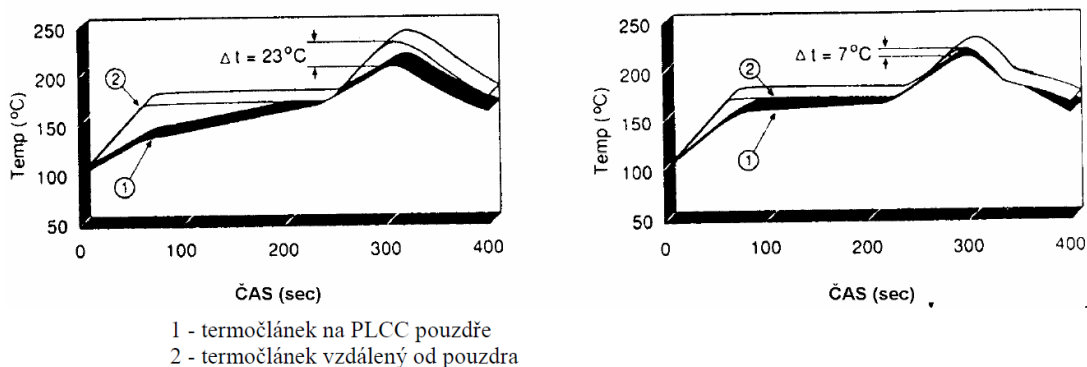
1.2.2 Pájení infračerveným zářením

Pájení infračerveným zářením je metoda, při které zářiče infračerveného elektromagnetického vlnění vysílají fotony směrem k pájené části, ať už lokálně nebo ve větším měřítku v peci. Energie, která je spojenem pohlcena, a tedy využita, závisí na vlnové délce záření, absorpčním koeficientu a barvě povrchu.

V metodě infrapájení hraje barva součástek stěžejní roli, neboť černá pouzdra komponent mají vyšší schopnost absorbovat infračervené záření než pájecí pasta, čímž dochází k nerovnoměrnému ohřevu. Ten může stát za celou řadou defektů. Na tuto skutečnost je třeba myslet při nastavování profilu.

Pece jsou nejčastěji konstruovány jako průběžné, tedy rozdělené do několika zón s různými teplotami, a teplotní profil je zajišťován dopravníkovým pásem. Tento model je vhodný pro efektivní pájení velkých objemů. Oproti tomu pro konstrukce prototypů je vhodnější vsázková pec, ve které je pájecí profil řízen změnou intenzity záření v průběhu času. [1]

Pro stabilizaci teploty a částečnou eliminaci vlivu zvýšené absorpce tepla pouzdry se infračervený ohřev kombinuje s nucenou konvekcí vzduchu. Díky tomu se zmenšuje rozdíl teplot v pouzdře a okolních strukturách. Pro lepší představu je uvedeno porovnání teplotních průběhů naměřených termočlánky při radiaci a přirozené/nucené konvekci na obrázku 3.



Obr. 3 Porovnání přirozené a nucené konvekce v radiční peci [1]

Důležité využití infračervené záření také nachází v pájení samostatných BGA, kde je možné vytvořit svazek paprsků působící pouze na konkrétní oblast a eliminuje se riziko teplotního stresu okolních součástek a spojů. Tento způsob se používá v servisních střediscích, výrobní závody vždy volí zapájení celé strany desky v rámci jednoho profilu.

Největší výhodou infračerveného pájení je vysoká efektivita procesu, která je až 70 %. Další velkou výhodou je snadné zvládnutí technologie.

K nevýhodám se řadí nestejný ohřev pouzder a okolí, což má za následek vysoké rozdíly v příčném teplotním profilu. Technologie se nadále nehodí pro desky s velmi hustou zástavbou prvků, neboť spoje v okolí pouzder (BGA...) bývají velmi často nedostatečně prohřáté. [1]

1.2.3 Kondenzační pájení

Metoda kondenzačního pájení vychází z principu předávání tepla kapaliny chladnějšímu předmětu, na kterém ke kondenzaci dochází. Deska osazená součástkami do pájecí pasty se vloží do kondenzační pájecí stanice, kde je pájecí médium udržováno ve formě nasycené páry. Nejčastěji se jedná o médium tvořené uhlovodíky, v současnosti je nejvíce používán perfluoropolyether (PFPE). Obecně je důležité, aby mělo médium teplotu varu vyšší, než je teplota tavení pájecí pasty, a aby se nestávalo příčinou koroze. [3]

Při předání dostatečného množství tepla a ohřátí pájecí pasty na teplotu tavení dojde k vytvoření spoje.

K výhodám kondenzačního pájení patří přesně definovaná teplota, která je dána médiem a není možné ji překročit a poškodit komponenty nadměrným teplem. Navíc díky definované atmosféře lze zamezit přístupu kyslíku a tím se vyhnout nežádoucí oxidaci.

Mezi nevýhody lze přiřadit zejména nutnost bezpečného nakládání s médiem z ekologických a zdravotních důvodů, navíc je šetrnost je vykoupena i delší dobou ohřevu, což se odráží na celkové ceně procesu. [1]

1.2.4 Laserové pájení

Laserové pájení je z principu své funkce speciálním případem pájení infračerveným zářením. Rozdíl spočívá zejména v použití. Zatímco IR pájení se používá pro pájení větších celků (od čipu až po celé desky), při pájení laserem fokusujeme paprsek koherentního záření do jednoho bodu. Jedná se tedy o bodové pájení řízené nejčastěji automatem. Hlavním faktorem produktivity se tak stává rychlost přesunu paprsku z jednoho bodu na jiný a následné zaměření.

Výhodou této technologie je vysoká přesnost s minimálním ovlivněním okolních součástek. Díky možnosti přesného namapování rozvržení (layoutu) desky je také možná automatizace. Každá komponenta může být ovšem zapájena specifickým profilem nastaveným ve vstupním souboru programu, což jiné technologie neumožňují. Dále je pak možné využít i pájecích past či pájek s vysokou teplotou tavení, aniž by hrozilo poškození součástky nadměrným ohřevem.

Mezi nevýhody lze zařadit již zmíněnou podmínku přesunu paprsku na každý spoj zvlášť, což značně snižuje produktivitu, a to i v případě kvalitní a rychlé automatizace. Další nevýhodou je pak cena zařízení. Obě negativa tuto technologii předurčují pouze ke speciálním aplikacím. [1]

1.2.5 Ultrazvukové pájení

Technologie ultrazvukového pájení je nejčastěji využívána pro selektivní pájení špatně pájitelných spojů, mnohdy nekovových. Technologie využívá princip vibrace a kavitace. Nahřátý hrot pájky má za úkol roztavit pájecí slitinu, zatímco ultrazvukové vibrace v ní tvoří kavity (vzduchové bublinky), které vlivem atmosférického tlaku praskají, což je spojeno s uvolněním značného množství energie. [4]

Díky této technologii je možné pájet hliník či nerezové slitiny. Taktéž je technologie vhodná pro pájení v aplikacích, kde není možno z důvodu právních restrikcí používat příliš kyselá tavidla. [4]

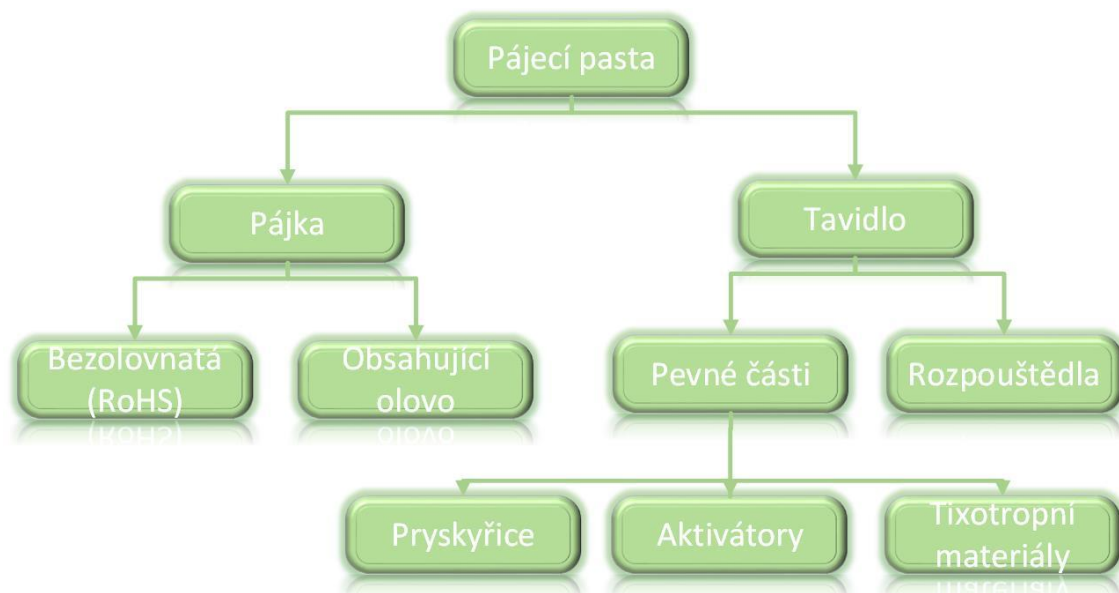
2 PÁJECÍ PASTA

Pro technologii pájení přetavením se až na výše zmíněné výjimky laserového a ultrazvukového pájení využívají pájecí pasty. Proto bude následující kapitola věnována zejména jim. Taktéž se zaměříme na použití pasty SnBi, o níž projevila společnost Osmont zájem a jejíž analýza je součástí práce.

2.1 Složení pájecí pasty

Pájecí pasta se skládá z pájky, což je slitina kovů ve formě prášku, která po přetavení tvoří hmotu spoje. Hmotnostní podíl pájky v pájecí pastě je 65–96 % (objemově asi 40 %). Další složkou pájecí pasty je tavidlo, které tvoří většinu objemu, ale naopak minoritní množství hmotnosti pasty. Tavidlo obsahuje rozpouštědla, aktivátory, modifikátory a tixotropní látky. Podíl a aktivita jednotlivých složek se liší dle použití pasty. [1]

V praxi rozlišujeme, jakým způsobem bude pasta nanášena a jaké vlastnosti od spoje očekáváme. Vhodnou kombinací těchto látek se snažíme dosáhnout ideální roztékavosti, smáčecí charakteristiky a teploty tavení.



Obr. 4 Schéma složení pájecí pasty

2.2 Pájecí slitiny

V dnešních moderních aplikacích se využívá téměř výlučně bezolovnatých pájecích slitin. Restrikce v používání olova se nevztahuje na aplikace vyžadující vysokou spolehlivost a zátěž, tedy v lékařství, vojenství, letectví, kosmonautice a v některých případech i automobilovém průmyslu. Vzhledem k tomu, že ani jedna z těchto aplikací se netýká problematiky řešené v této práci, dovolím si omezit výčet pájek pouze na již zmíněné bezolovnaté, které splňují legislativní požadavky a jsou tzv. RoHS shodné.

Pájecí slitina se v pájecí pastě vyskytuje v podobě tzv. prášku. Mnohé faktory, jako roztékavost či smáčecí charakteristiky, jsou dány velikostí zrn. Obecně lze říci, že se zmenšující se velikostí zrn roste přesnost nanášení, zatímco roste náchylnost pájky k oxidaci z důvodu většího povrchu. Oxidy pájecích kovů zhoršují roztékavost a způsobují nehomogenity v pájeném spoji, které bývají zdrojem prasklin a voidů. Je tedy důležité pájecí pasty co nejméně vystavovat vlivu vzdušného kyslíku. [5]

Podstatné je, aby velikost zrn v pastě byla, pokud možno, stejná. Jenom tak může dojít ke stejnoměrnému ohřevu a přechodu solidu na liquid celého objemu pájky v co nejúžším časovém rozestupu.

V následujících třech tabulkách jsou zobrazeny nejčastěji využívané slitiny měkkých pájek a jejich teploty tavení, které je limitující pro nastavení pájecího profilu a klíčové k určení a výpočtu integrálu teploty a času, jenž do spoje vstupuje.

Tabulka 1: Pájecí slitiny s teplotou tavení pod 180 °C [1]

Systém	Složení (hm%)	Rozsah teplot tavení [°C]
Sn-Bi	Sn-58Bi	138 (e)
Sn-In	Sn-52In	118 (e)
	Sn-50In	118–125
Bi-In	Bi-33In	109 (e)

Tabulka 2: Pájecí slitiny s teplotou tavení mezi 180–200 °C [1]

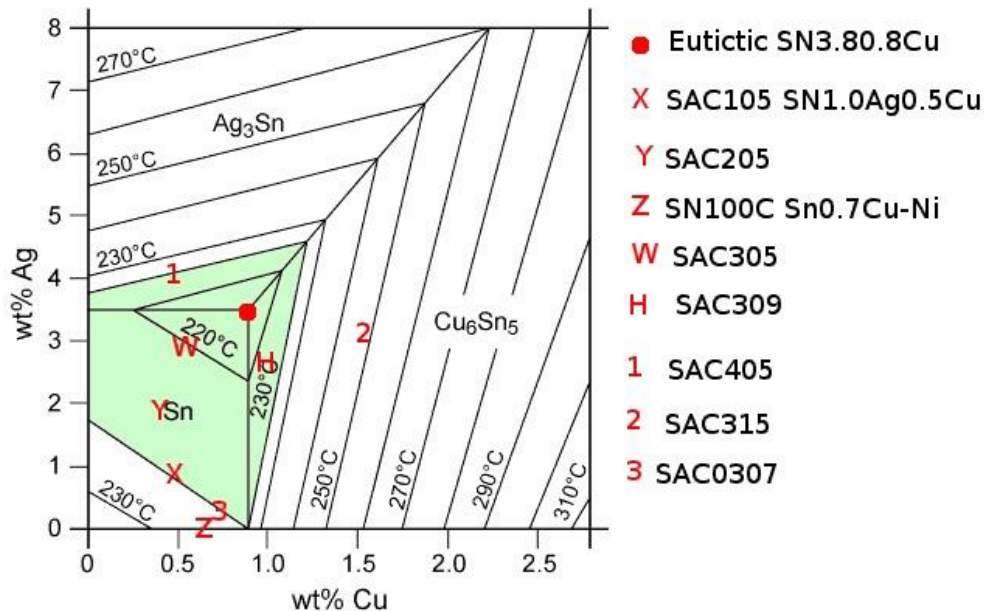
Systém	Složení (hm%)	Rozsah teplot tavení [°C]
Sn-Zn	Sn-9Zn	199 (e)
Sn-Bi-Zn	Sn-8Zn-3Bi	189–199
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143–193

Tabulka 3: Pájecí slitiny s teplotou tavení mezi 200–230 °C [1]

Systém	Složení (hm%)	Rozsah tep. tavení [°C]	Značení
Sn-Ag	Sn-3,5Ag	221 (e)	SA
Sn-Cu(+Ni)	Sn-0,7Cu (+ 0,05 Ni)	227 (e)	SC, SN100C
Sn-Ag-Bi	Sn-3,5Ag-3Bi	206–213	
Sn-Ag-Cu	Sn-3,8Ag-0,7Cu	217 (e)	SAC
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0,8Cu-0,5Sb	216–222	

Jak je vidět, systémy se liší procentuálním zastoupením jednotlivých složek a obsaženými prvky. V některých případech se můžeme setkat s eutektickou slitinou (e). Použití eutektické slitiny je výhodné zejména proto, že všechny její části v tomto eutektickém bodě tuhnou stejně rychle. Nestihnou se tak vytvořit velké krystaly jednoho prvku, které by měly špatný vliv na pevnost pájeného spoje. Navíc zde dojde k lepšímu promísení obou složek, které je nezbytné k tomu, aby slitina měla vlastnosti, jež od ní očekáváme. [7]

Na obrázku 5 je uveden názorný příklad fázového diagramu popisujícího jednotlivé fáze slitiny SAC pro různé procentuální zastoupení všech tří kovů. Všimněme si zejména, jaký vliv má podíl kovů v pájce na teplotu tavení a na výskyt intermetalických sloučenin v případě nevhodné volby poměru jednotlivých složek.



Obr. 5 Fázový diagram SAC pájky [6]

Funkce jednotlivých kovů v pájecích slitinách:

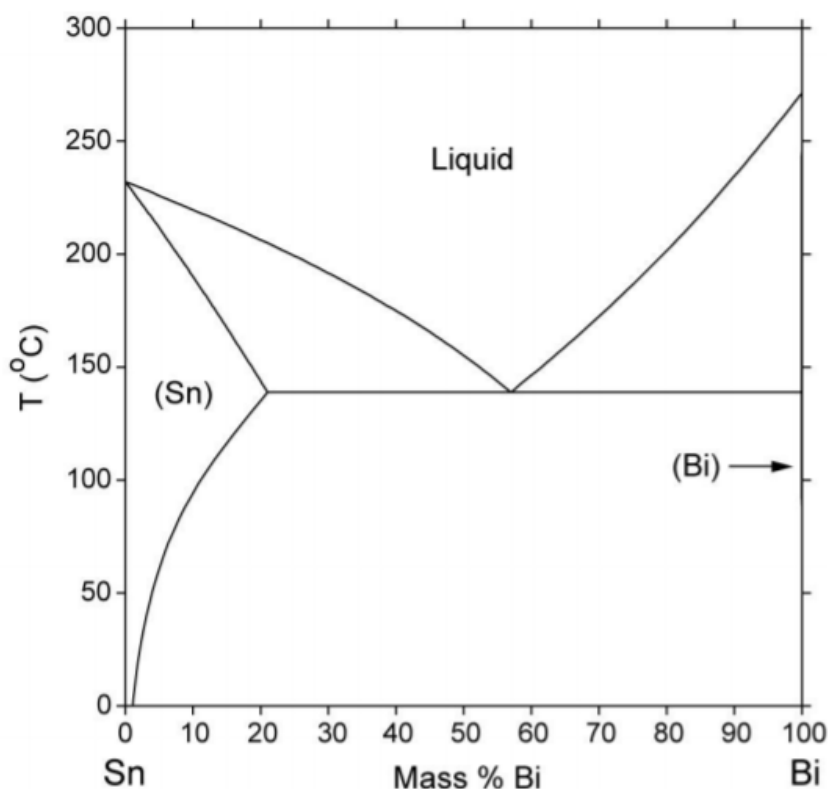
- **cín (Sn)** – základní kov v pájkách jak olovnatých, tak bezolovnatých; jeho hlavní výhodou je dobrá smáčivost povrchů a poměrně nízká teplota tavení; má dobrou elektrickou i tepelnou vodivost; nevýhodami jsou nízká mechanická pevnost a snadná tvorba intermetalických slitin
- **měď (Cu)** – v pájkách hojně používaný prvek, zvláště pro výrobu vodičů; má dobrou smáčivost a mechanickou pevnost; nevýhodou je, že se rozpouští v pájkách s vysokým obsahem cínu, čímž ovlivňuje jakost (snížení pevnosti a zvýšení rezistivity)
- **stříbro (Ag)** – drahý kov; má dobré elektrické vlastnosti; používá se pro tvorbu bezolovnatých pájek; snižuje bod tání; zlepšuje smáčivost a zvyšuje pevnost spoje
- **bismut (Bi)** – snižuje bod tání; smáčivost je spíše průměrná; výhodou je nízká cena; získává se jako produkt při čištění olova
- **indium (In)** – má velký vliv na snížení bodu tavení slitiny; teplota tavení je 156 °C; má dobrou smáčivost povrchu; mechanické vlastnosti jsou podprůměrné; vysoká cena kovu a vysoká spotřeba v eutektických pájkách využití snižuje
- **antimon (Sb)** – zvyšuje pevnost; snižuje povrchové napětí; toxický pro lidský organismus
- **zinek (Zn)** – má nízký bod tání; výhodou je nízká cena
- **nikl (Ni)** – zabraňuje odsmaččení
- **germanium (Ge)** – zabraňuje oxidaci

[8], [9]

2.3 Pájecí slitina SnBi

Bismut je velmi častým substituentem olova v bezolovnatých pájecích pastách. Jeho obliba je způsobena zejména vlastností snižovat teplotu tavení výsledné slitiny. Zatímco SAC se taví při 217 °C a slitina cínu a mědi dokonce při 227 °C, SnBi se taví již při 138 °C.

Díky této unikátní vlastnosti se hodí pro použití v kombinaci s komponentami, které jsou citlivé na poškození vysokou teplotou. Může se jednat o moduly s flexovými kabely, jako jsou kamery, displeje či dotykové panely. Na rozšíření se také podílí příznivá cena pasty.



Obr. 6 SnBi fázový diagram [13]

Mezi nevýhody této pasty můžeme zařadit mírně horší smáčecí charakteristiky, které jsou ale stále nadprůměrné v množině bezolovnatých pájecích past.

Z výzkumu [13] vyplývá, že SnBi pájka je náchylná na mechanické poškození při vibračních a nárazových testech. Autorka tuto skutečnost přisuzuje omezené vzájemné rozpustnosti cínu a bismutu. Zatímco bismut je v cínu dobře rozpustný a během formování spoje do něj proniká až z 21 %, cín je v bismutu prakticky nerozpustný.

Při podrobnější analýze zjišťujeme, že spoj tvoří IMC Cu_6Sn_5 a solitérní krystaly bismutu bez příměsí cínu. Tato omezená schopnost tvorby intermetalické sloučeniny má za následek sníženou pevnost spoje a již zmíněnou náchylnost k mechanickému poškození.

2.4 Tavidla

Funkci tavidla můžeme rozdělit na chemickou, fyzikální a tepelnou. [1]

- **Chemická funkce:** Díky své vysoké reaktivitě dokáže odstraňovat zbytky nečistot a oxidů na povrchu, kde se má vytvořit pájený spoj. Dále vytváří ochranné prostředí, které brání další oxidaci.
- **Fyzikální funkce:** Po chemickém působení tavidla zůstávají na pájeném povrchu produkty těchto reakcí. Fyzikální funkcí tavidla je jejich odstranění z pájeného povrchu a umožnění přímého styku pájky s oběma pájenými povrchy. Další důležitou funkcí je snížení povrchového napětí mezi pájkou a pájenou plochou, což umožní dobré roztečení pájky a vytvoření kvalitního spoje.
- **Tepelná funkce:** Další velmi důležitou funkcí je podpora přenosu tepla k pájenému místu. Tento bod opět nabývá mnohem větší důležitosti u bezolovnatých pájek s vysokou teplotou tavení, kde se teploty tavení pohybují často na maximální hranici technologického okna. Pokud není přenos tepla dostatečný, je třeba zvýšit teplotu pájecího profilu či profil prodloužit. Oba zmíněné postupy však mají vliv na kvalitu spoje i životnost osazených součástek.

Tavidla obsahují rozpouštědla, aktivátory, reologické modifikátory a pryskyřice. Rozpouštědla udržují pastu v aplikovatelném stavu, po přetavení se odpaří. Obsah rozpouštědla v pastě také ovlivňuje lepivost pasty po nanesení. Nejčastěji se využívaly glycoether či složité alkoholy, tedy těkavé organické sloučeniny (VOC). V souvislosti s environmentálními závazky firem se taktéž rozvíjí používání VOC FREE tavidel na bázi vody. [10]

Pryskyřice má v tavidle několik důležitých funkcí. Chrání natisknutou pastu proti propadu, zajišťuje lepivost, tedy přilnutí pasty k povrchu, a zabarvuje zbytky tavidla, čímž usnadňuje čištění. Kromě toho ovlivňuje i vlastnosti při tisku a celkovou pájitelnost. Využívají se jak přírodní, tak syntetické pryskyřice. Ty převažují nad ustupujícími nosiči na bázi organických či anorganických kyselin.

Aktivátory v pájecí pastě mají 3 hlavní funkce. Během formování spoje se roztékají po kovovém povrchu a reagují s oxidy, které tímto odstraňují, výrazně zvyšují smáčecí charakteristiku povrchů úpravou povrchového napětí a po vytvoření spoje brání další oxidaci. Díky těmto vlastnostem mají zásadní vliv na pájitelnost, spolehlivost a životnost spoje. Mezi nejběžnější aktivátory patří organické kyseliny, postupně se upouští od halogenidů, opět z důvodu environmentálních závazků firem.

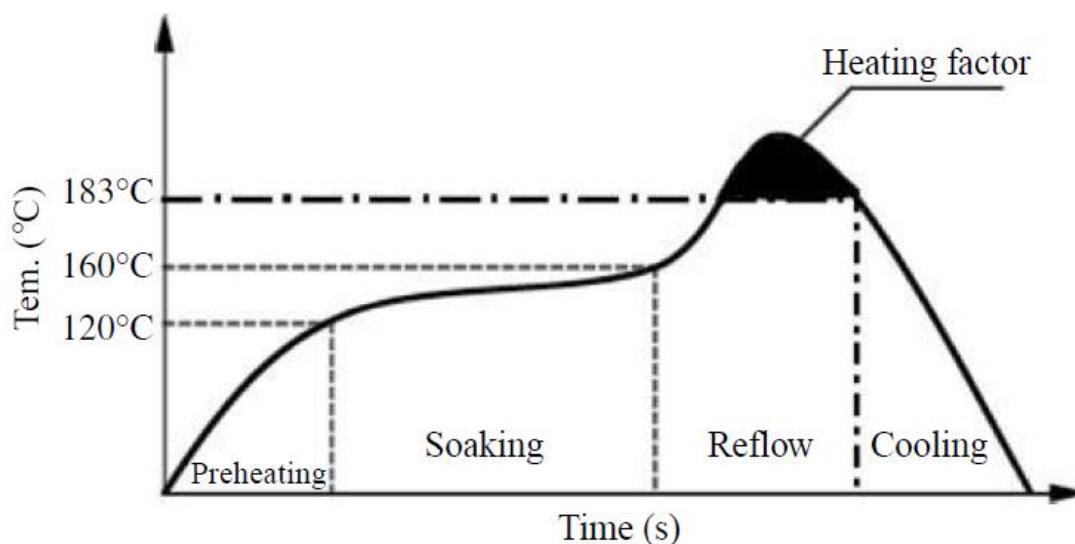
Tixotropní aditiva mají zásadní vliv na tisknutelnost pasty na povrch desky. Tixotropnost je schopnost pasty smykovým třením snížit svou viskozitu (snadné nanesení) a po uvolnění tlaku opět viskozitu navýšit (zamezení roztečení nanesené pasty). Často se využívá vosku či alifatických amidů. [10]

3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU PÁJENÉHO SPOJE

3.1 Integrál teploty a času

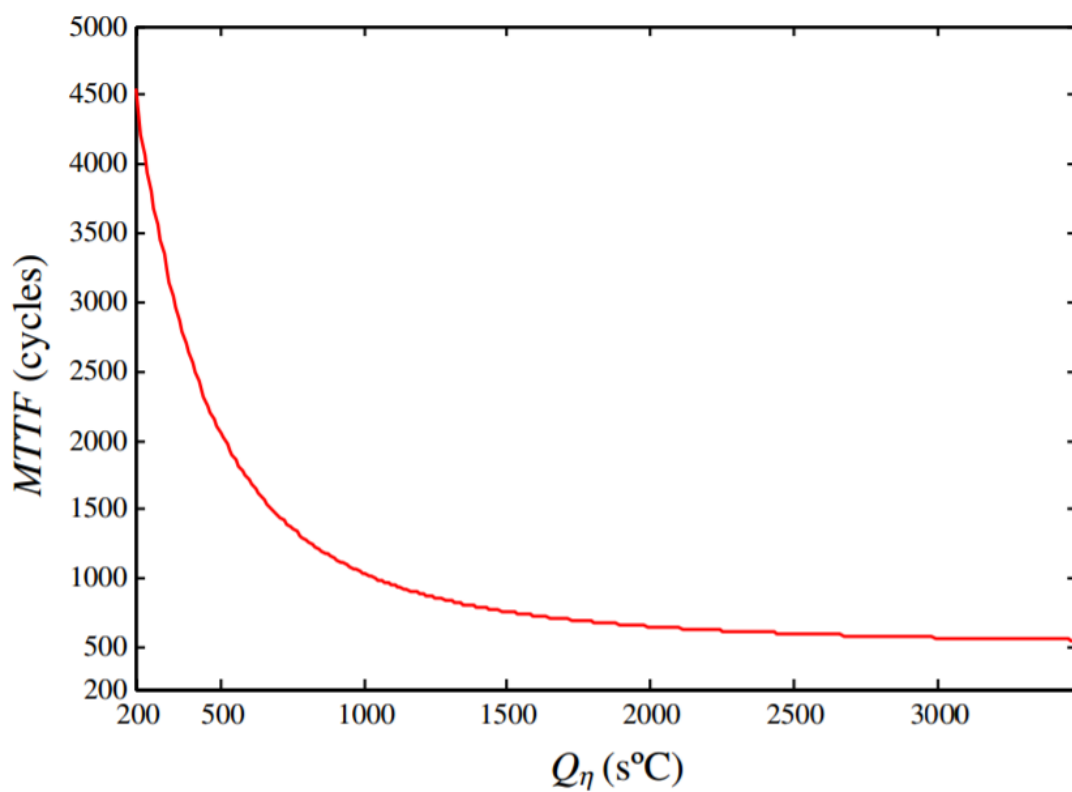
Integrál teploty vyjadřuje účinek teploty a času, během kterého na spoj tato teplota působila. V zahraniční literatuře se označuje jako tzv. Heating factor a značí se $Q\eta$. Bo Tao [11] ve své práci uvádí, že $Q\eta$ lze využít k předpovědi spolehlivosti a kvality pájeného spoje, neboť vyjadřuje míru stresu a teplotního namáhání v průběhu pájení. Dále pak je možné integrál teploty využít k odhadu střední doby do poruchy (MTTF).

S pomocí této metody lze předpovídat tloušťku a strukturu intermetalických vrstev (IMC) a na základě experimentálních poznatků odhadnout životnost pájeného spoje.



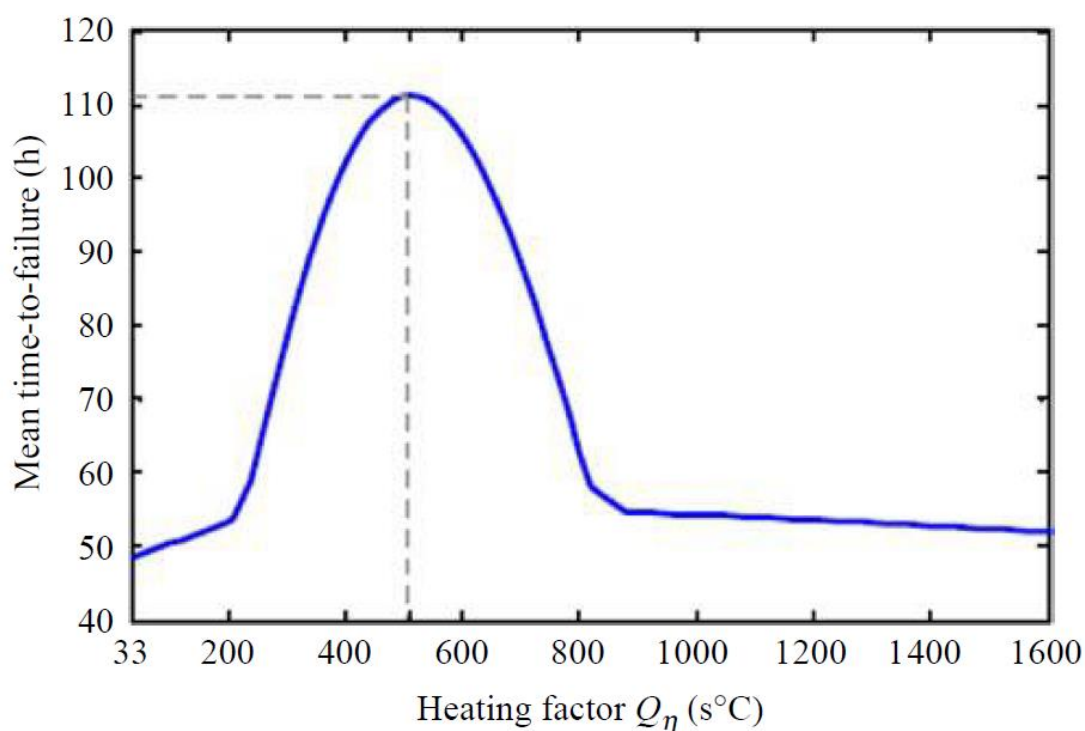
Obr. 7 Definice integrálu teploty a času pro pájecí slitinu Sn63Pb37 [12]

Tao ve svých experimentech [11], [12] prováděl dva testy spolehlivosti na vzorcích s různými hodnotami $Q\eta$. První test lze popsat jako cyklické teplotní namáhání, ze kterého sestavil následující závislost.



Obr. 8 Závislost střední doby do poruchy na integrálu teploty a času při cyklickém teplotním namáhání [11]

V následujícím experimentu využil vibrační test se vzorky s různým Q_{η} během přetavení. Charakteristika závislosti střední doby do poruchy na integrálu teploty a času je odlišná.



Obr. 9 Závislost střední doby do poruchy na integrálu teploty a času při vibračním namáhání [12]

Přirozeně se nabízí srovnání obou výsledků. Tao [12] tento výsledek odůvodňuje vztahem k intermetalické vrstvě IMC. Zatímco u příliš vysoké hodnoty integrálu je IMC narostlá natolik, že spolehlivost ohrožují převážně nepříznivé vlastnosti právě intermetalických sloučenin, nízká hodnota integrálu je kompenzována samotným teplotním namáháním, kdy se postupnou difuzí kovů dotvoří. Spoj je tak spolehlivější delší dobu.

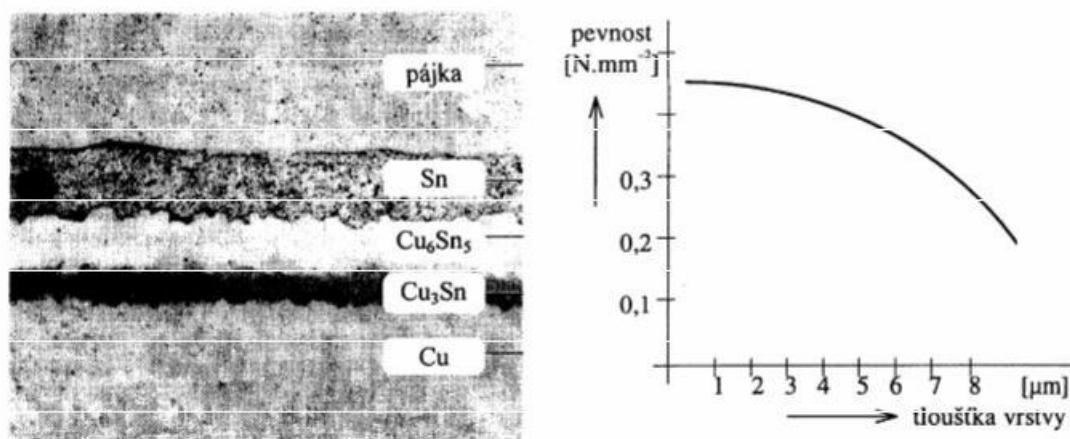
U vibrační zkoušky však spoj nemá potřebné podmínky pro vytvoření chybějící IMC, a tak spoje s nízkou hodnotou integrálu, a tedy i tenkou vrstvou IMC, vykazují nejkratší dobu do chyby. Poté následuje oblast s nejvyšší spolehlivostí, kterou následuje opět pokles. Příčina nízké spolehlivosti je zde stejná jako v případě teplotního namáhání, a to nežádoucí křehkost IMC.

Výsledky tedy můžeme interpretovat tak, že pro spolehlivost spoje při jeho teplotním namáhání nemá integrál teploty a času spodní mez, pevnost spoje při mechanickém namáhání je nejvyšší pro hodnoty Q_{η} v rozmezí 400 až 600 s.°C. Tato hodnota ale platí pro eutektickou SnPb pájku, kterou v praktické části využívat nebudeme a rozmezí bude potřeba vhodně upravit dle specifikací výrobce použitých past. Obecně však lze konstatovat, že z důvodu použití vyšších teplot bude procesní okno užší. To by mohlo částečně kompenzovat použití SnBi pájecí pasty.

3.2 Vliv intermetalické vrstvy

V průběhu pájení dochází k chemickým reakcím a fyzikálnímu přesunu kovů na rozhraní pájecích ploch a pájky. Tyto procesy jsou základními podmínkami pro tvorbu a formování spoje.

Pájka v roztaveném stavu je pro většinu kovů agresivním rozpouštědlem, což je důvod pro vzájemný přechod kovu pájky a pájecí plošky. Tyto kovy poté na rozhraní tvoří takzvané intermetalické nebo také mezikovové sloučeniny. Těch je zpravidla několik, podle koncentrací v konkrétní části spoje. Například na rozhraní měděné pájecí plošky a pájky s většinovým obsahem cínu se setkáváme se sloučeninami Cu_3Sn v oblasti s vyšší koncentrací mědi a sloučeniny Cu_6Sn_5 v oblasti, kde není rozdíl v koncentracích natolik patrný. [14], [15]



Obr. 10 Průřez pájeným spojem na rozhraní mědi a cínu [1]

Zatímco vrstva Cu_3Sn se utváří bezprostředně v průběhu pájení na základě rozdílu koncentrací na přechodu tekuté pájky a mědi a po vytvoření spoje se už zpravidla nerozšiřuje, vrstva Cu_6Sn_5 se v průběhu životnosti spoje dále rozšiřuje vlivem stárnutí, zejména cyklických teplotních změn. [17]. [18]

Na formování intermetalické vrstvy má vliv složení pájky, teplota a čas nad liquidem, rychlost chlazení, teplota a doba stárnutí spoje a v neposlední řadě také povrchová úprava mědi. Základní podmínkou pro vznik intermetalické fáze je existence difúze a vzájemná rozpustnost kovů. To splňují například cín a měď, naopak olovo či bismut, který je v této práci použit, se tvorby IMC neúčastní vůbec. Pájecí slitiny s jejich příměsí tedy tvoří intermetalické vrstvy v menší míře. [16], [20]

Ač je přítomnost IMC nezbytná pro vzájemnou soudržnost pájecího kovu s pájenou plochou, negativním dopadem těchto vrstev jsou jejich vlastnosti, které se výrazně odlišují od vlastností kovů, ze kterých byly vytvořeny. Mezi ně se řadí zpravidla nižší elektrická vodivost a výrazně nižší mechanická pevnost. [1]

Zejména křehkost intermetalických vrstev vede k požadavku jejich redukce na co nejnižší míru, kdy zůstane zajištěna dostatečná pevnost spoje, ale minimalizuje se šance, že se projeví jejich nežádoucí vlastnosti. Je důležité také zmínit, že vedle tloušťky intermetalické vrstvy má vliv na pevnost spoje také její krystalická struktura potažmo velikost krystalů.

Již byla zmíněna závislost na povrchové úpravě mědi. Zatímco OSP umožňuje prakticky okamžitý vznik obou vrstev, tedy Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 , měď opářená imerzním cínem již obsahuje vrstvu Cu_6Sn_5 před samotným pájením. Ta ve spoji po zapájení zůstává a vrstva Cu_3Sn se naopak tvoří až v průběhu stárnutí spoje.

Povrchová úprava ENIG (Ni a Au) má při tvorbě intermetalické vrstvy aktivní roli, neboť nikl i zlato se účastní spolu s mědí a cínem terciárních a kvartérních intermetalických sloučenin. IMC s obsahem niklu má ze všech intermetalických sloučenin nejhorší elektrickou vodivost a zlato díky své vysoké difuzní schopnosti umožňuje rychlejší růst IMC. Spoj s touto povrchovou úpravou má z výše zmíněných technologií nejhorší vlastnosti při cyklickém stárnutí. [1], [19]

Panely, kterými se zabývá praktická část práce byly ošetřeny OSP povrchovou úpravou.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část práce se zabývá samotnou analýzou hotových LED panelů. V rámci semestrálního projektu byla provedena analýza spojů za použití rentgenové tomografie. Dále byl vytvořen mikrovýbrus, který byl následně analyzován pomocí elektronového mikroskopu.

V rámci diplomové práce jsou postupně srovnány tři generace produktu – původní, která byla zaslána k analýze, nová verze se stejnou SAC pastou a pozměněným profilem, aby lépe odpovídal požadavkům výrobce, a nakonec zkušební verze s SnBi pastou na přání společnosti Osmont.

Výsledkem je porovnání získaných dat na jednotlivých vzorcích přetavených různými profilem a za použití různých pájecích past. Výsledek této práce by měl sloužit k nastavení technologického postupu, který povede k vyšší kvalitě produktu.

Pracovní postup odpovídá řazení jednotlivých kapitol. Nejprve byly změřeny profilem SAC pasty za různých podmínek. Poté byl navržen SnBi profil a po jeho doladění byly vytvořeny prototypy LED panelů s pomocí této pasty.

Tyto panely pak byly analyzovány pod rentgenovým tomografem a následně podrobeny odtrhové zkoušce v laboratoři FEKT VUT. Poté byly vytvořeny mikrovýbrusy ze všech vzorků a ty analyzovány pod optickým a elektronovým mikroskopem.

4.1 SAC pájecí pasta a vliv teplotního profilu

Pájecí pasta Encorel je SAC pasta s přesným složením $\text{SnAg}_3\text{Cu}_{0.5}$. To znamená, že do cínu jsou přidány 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Podíl hmotnosti kovu je 88 % a velikost kovových částí je 25–45 μm .

Tato pasta má bod tání (tzv. melting point) na 217 °C. Neobsahuje halogeny a viskozitu má v mezích 750–950 Pa.s.

4.1.1 Procesní okno doporučené výrobcem pasty

Výrobce pasty Encorel v technickém listu udává doporučené parametry teplotního profilu pro maximální využití potenciálu této pasty.

Výňatek z technického listu můžeme vidět na obrázku níže:

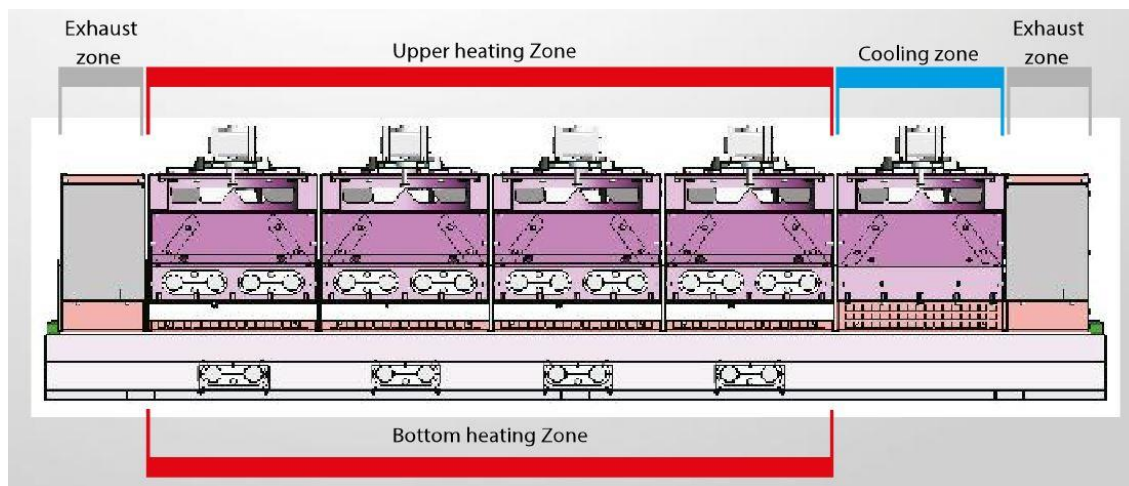
Preheating ramp rate with linear preheating	0.7 to 1.2°C/s according the circuit board size and density
Preheating steps in case of preheating soak zone	<ul style="list-style-type: none"> - From 20 to 150°C: ramp rate 1 to 2°C/s - soak zone between 150 to 180°C for 60 to 140s - from 170°C to liquidus 1 to 2°C/s
Peak ramp rate	1 to 2°C/s
Peak temperature	235 to 250°C (240 to 245°C is optimum) The paste can stand a temperature higher than 250°C, but it is not recommended in order to preserve component integrity
Time above liquidus	45 to 100s (55 to 70s typical)
Cooling ramp rate	1.8 to 7°C/s (studies have demonstrated 1.8 to 2.2°C/s allows homogeneous joint structure and reduce surface cracks formation)

Obr. 11 Doporučené nastavení profilu dle výrobce SAC pasty Encorel

Společnost Osmont v současné době využívá pec společnosti Autotronik. Jedná se o pec se čtyřmi aktivními zónami pro ohřev, která umožňuje zvlášť nastavit spodní a vrchní topná tělesa.

Schéma pece z technického listu výrobce je na obrázku níže. Na něm vidíme již zmíněné zóny ohřevu s nezávislým zdrojem tepla spodní a vrchní části a chladicí zónu.

V době psaní práce byla pec již postupně nahrazována novou modernější pecí, která se ovšem dočká svého uvedení do provozu až po termínu odevzdání diplomové práce. Proces byl tedy vyvíjen s ohledem na snadnou přenositelnost na nový hardware.



Obr. 12 Schéma přetavovací pece Autotronik

4.1.2 Metodika měření teplotního profilu

Měření teplotního profilu bylo provedeno pro dva profily SAC, kdy první profil prošel standardní cestou odběru tepla. Nejprve bylo do pece vloženo 6 kusů stejných desek, které měly za úkol odebrat definované množství tepla, stejně jako při běžné produkci. Ty byly od sebe vzdáleny 1,5násobek velikosti desky. Poté byl změřen profil druhý, kdy pecí prošel samotný profiloměr, aniž by předem bylo odebráno jakékoliv teplo.

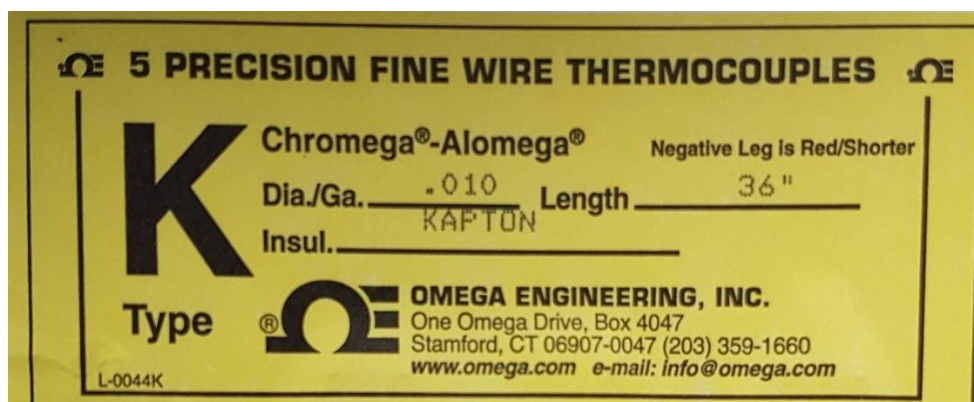
Třetí sada měření byla prováděna během návrhu a optimalizace teplotního profilu pro SnBi pájecí pastu.

Teplotní profil byl měřen pomocí profiloměru Slim KIC, který je součástí vybavení laboratoře propojovacích a montážních technologií na FEKT VUT. Uživatelské rozhraní je zajištěno pomocí software KIC 2000.



Obr. 13 Profiloměr Slim KIC s tepluvzdorným obalem

Pro měření jsme využili 4 termočlánky typu K společnosti Omega engineering.

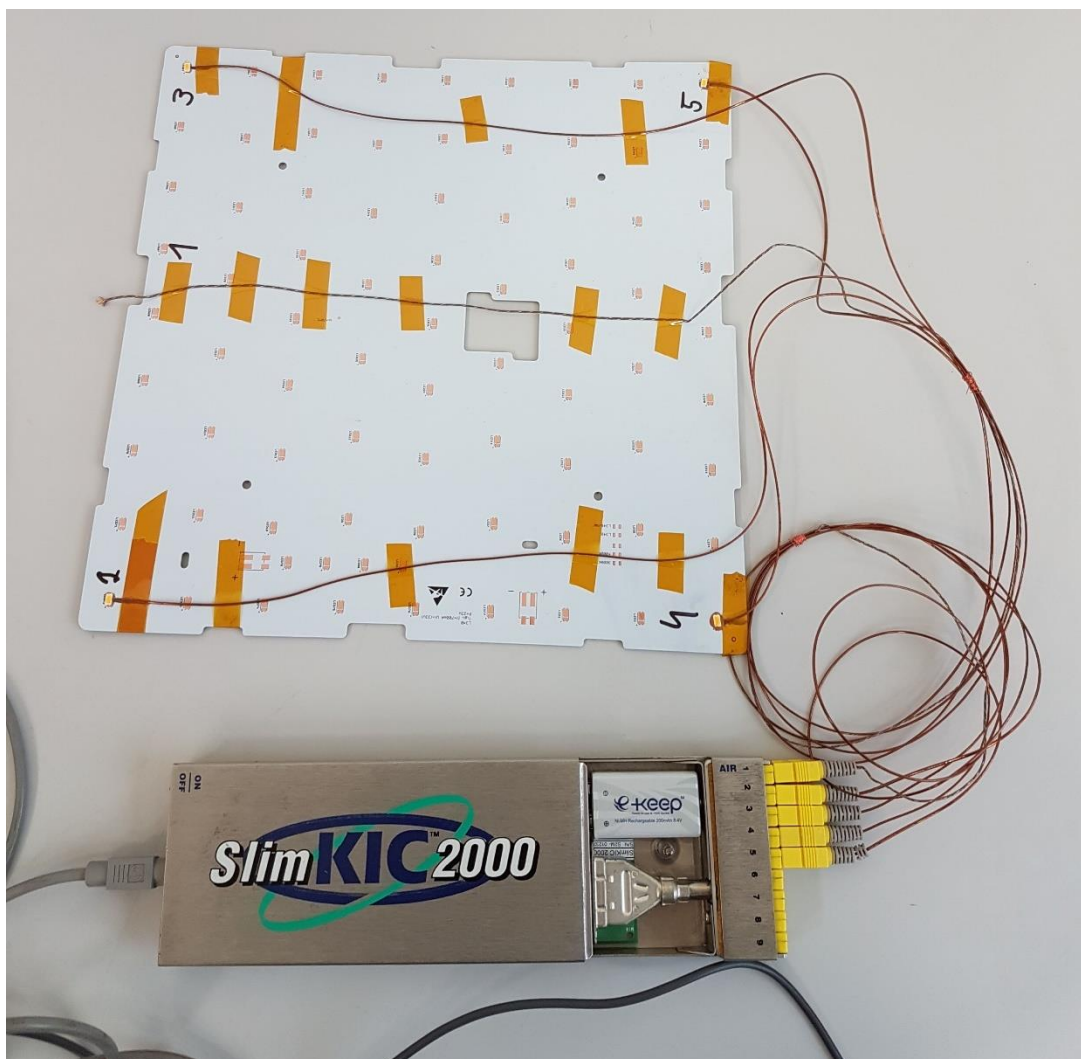


Obr. 14 Použité termočlánky

Termočlánky byly upevněny na neosazenou desku a s použitím epoxidového lepidla umístěny pod LED. Tím bylo dosaženo simulace obdobných podmínek, jakými bude procházet během přetavení pasta, která je natištěná pod diodami. Fixace byla zajištěna kaptonovou lepicí páskou.

Výsledný měřicí přípravek pro toto měření napojený na profiloměr KIC je vidět na následující fotografii.

Termočlány jsou umístěny do rohů desky, čímž je pokryta celá plocha přípravku. Uprostřed vidíme ještě termočlánek použitý jako Air neboli indikátor teploty vzduchu. Ve chvíli, kdy se na tomto termočlátku naměří předem definovaná teplota, začne záznam měření. Ve výsledném profilu již data z tohoto článku viditelná nejsou.



Obr. 15 Hotový přípravek pro měření SAC teplotního profilu

Po projití přípravku rozehrátou pecí na požadovanou teplotu profilu a připojení profiloměru k počítači jsou data přečtena a profil automaticky vyhodnocen. Poté je sestaven automatický report, který obsahuje většinu dat pro určení, zda je profil vyhovující, či zda jsou potřeba další úpravy. Pro podrobné informace je možné uložit logovací soubor z měření ve formátu pro tabulkový procesor Excel.

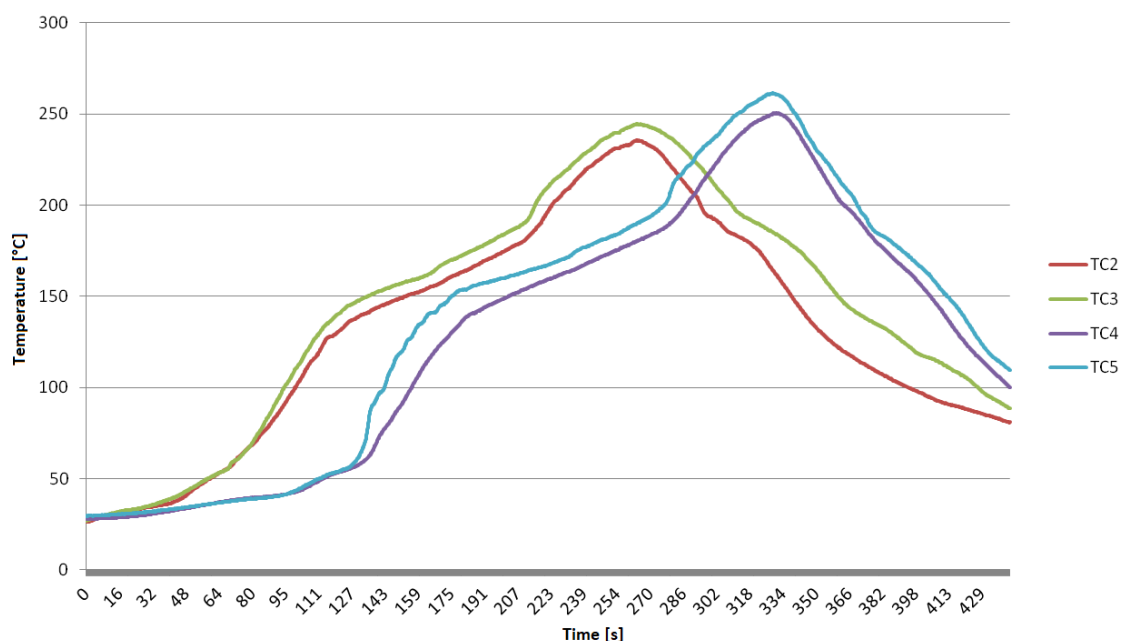
Měření bylo prováděno na maximální možnou přesnost měření, tedy rychlostí 10 záznamů za sekundu.

Výsledný report teplotního profilu je sestavován pomocí automatického algoritmu, díky kterému jsou hodnoty ze všech termočlánků shrnuty pod jednu časovou osu. Pokud tedy jsou články umístěny dále od sebe ve směru průchodu pecí, software tento časový posun vykompenzuje. Výsledek tak je lépe srovnatelný, ovšem některé informace mohou zaniknout, jak si ukážeme dále.

4.1.3 Profil 1 a dosažené výsledky

První měření bylo prováděno v předeřáté peci, ve které nejprve projelo 6 ks desek typu L32, které jsou předmětem analýzy, následně měřící souprava složená z desky FR4 s upevněnými termočlánky a poté s odstupem vzdálenosti jedné desky profiloměr.

Vlivem průchodu desek s určitou tepelnou kapacitou došlo k odběru tepla, a tedy mírné změně přetavovacího profilu naměřeného sondou od druhého měření, kdy byla peci puštěna samostatná měřící souprava.



Obr. 16 Teplotní profil bez automatického zpracování

Na obrázku můžeme vidět průběh pecí, kde jsou zřejmé odstupy předních a zadních termočlánků. Takto sestavený graf není vhodný pro porovnání teplot, proto je algoritmicky převeden na jednotnou časovou osu pomocí software KIC 2000. Výsledek této úpravy vidíme v protokolech obou měření. Pokud však chceme lepší přehled o teplotách v přední a zadní části desky, je takovéto zobrazení přehlednější.

V časovém záznamu vidíme, že teplota pasty přesahuje pod diodou 250 °C, na diodě je pak teplota přirozeně ještě o málo vyšší. Zde je nutno uvést, že teplota se blíží maximální hranici, kterou uvádí výrobce LED. Kompletní informaci z technického listu můžeme vidět níže:

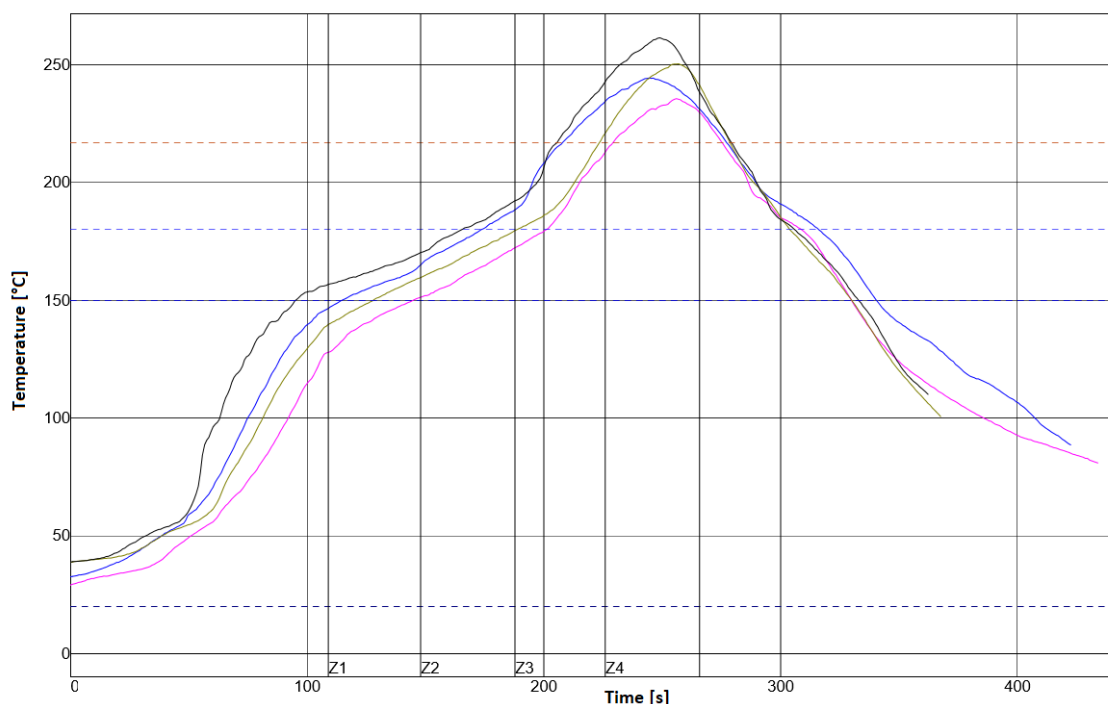
1) Absolute Maximum Rating

Item	Symbol	Rating	Condition
Operating temperature range	T_{op}	-40°C ~ +85°C	-
Storage temperature range	T_{stg}	-40°C ~ +120°C	-
LED junction temperature	T_J	110°C	-
Forward Current	I_F	150 mA	-
Peak Pulsed Forward Current	I_{FP}	300 mA	Duty 1/10 pulse width 10ms
Thermal resistance	$R_{th, j-s}$	16°C/W	Junction to solder point
Assembly Process Temperature	-	260°C, < 10sec	-
ESD	-	5kV	HBM

Obr. 17 Informace výrobce k LED

Nyní se pojdme podívat na informace o tomto měření, které nám vygeneroval software KIC 2000.

Setpoints (Celsius)				
Zone	1	2	3	4
Top	155	170	190	265
Bottom	155	170	190	265
Conveyor Speed (cm/min): 26.0				



PWI= 280%	Max Rising Slope	Max Falling Slope	Preheat 20-150C	Soak Time 150-180C	Peak Temp	Tot Time /217C						
2L	1.80	59%	-1.97	16%	144.02	151%	56.33	-109%	235.67	-91%	45.98	-96%
3R	1.97	94%	-1.51	244%	114.21	43%	59.11	-102%	244.43	26%	69.24	-12%
4L	1.87	74%	-1.94	30%	128.34	94%	61.02	-97%	250.40	105%	55.03	-64%
5R	2.90	280%	-2.07	-36%	94.89	-28%	70.17	-75%	261.45	253%	73.50	4%
Delta	1.10		0.56		49.13		13.84		25.78		27.52	

Obr. 18 Zpracovaný report ze SW KIC 2000 pro průchod měřícího přípravku mezi deskami

V reportu vidíme zejména časový záznam, který je posunutý na jednotnou osu, nad ním nastavení pece a pod ním informace pro další nastavení profilu. Tuto část využijeme zejména při sestavování profilu pro SnBi pájku, nicméně pro vysvětlení naměřených hodnot ji popíšeme již nyní.

Na tomto příkladu si uvedeme nevýhodu posunutí osy. Na předchozím teplotním záznamu bez posunutí vidíme zvlášť přední a zadní část. Z grafu je zřejmé, že zadní část desky je vystavena vyšší teplotě než část přední. Dále vidíme i příčný profil, ze kterého je zřejmé, že pravá strana pece topí více než strana levá.

Zastavím se u prvního faktu. Přední část desky je vystavena nižší teplotě než strana zadní. To by se na první pohled mohlo zdát nejasné. Dejme tomu, že ve chvíli, kdy deska vjíždí do pece, je teplota ideálně nastavená.

Bohužel deska i komponenty mají určitou tepelnou kapacitu, takže část tepla odeberou. Pec na tento fakt reaguje aktivací topných těles, která zónu ohřejí na vyšší teplotu, než jaká je nastavená. Konkrétní případ této oscilace teploty je uveden v kapitole zabývající se nastavením SnBi profilu, kde díky nižším teplotám nabývá na významu. Tedy zadní část desky je z důvodu dodatečného ohřevu vystavena dočasně vyšší teplotě, než na kterou je pec nastavená.

Co se příčného teplotního profilu týče, pravá strana vykazovala vyšší teploty během všech kontrolních měření. Tento fakt je jeden z důvodů plánované modernizace vybavení.

Z protokolu porovnávajícího procesní okno doporučené výrobcem pasty s naměřenými hodnotami je patrné, že doba nad liquidem je na minimu (45 s) procesního okna. U desky přetavené tímto profilem lze očekávat zejména malé množství intermetalických sloučenin spolu s malou mechanickou pevností a větším množstvím voidů, které neměly „čas“ ze spoje uniknout.

4.1.4 Profil 2 a dosažené výsledky

Druhé měření probíhalo pouze pomocí samostatné měřicí soupravy. Zde jsme očekávali ideální profil dle předepsaných doporučení výrobcem pájecí pasty.

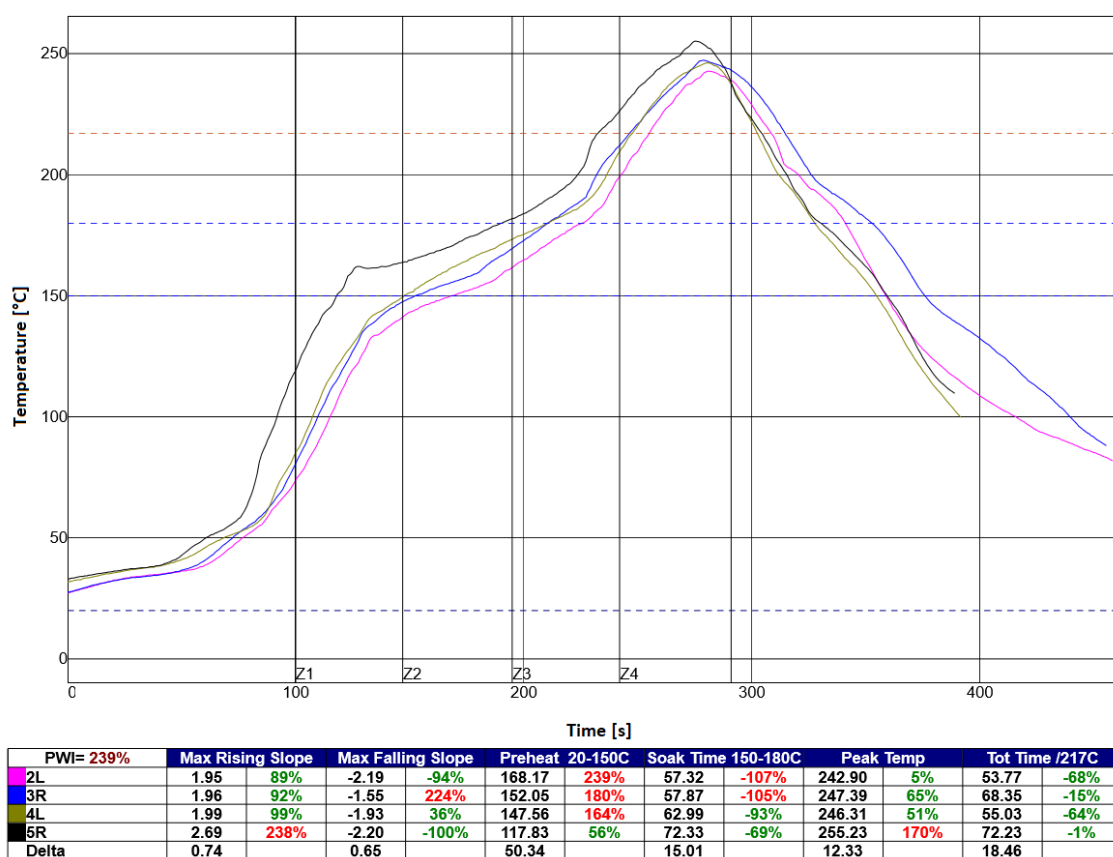
Výsledek vidíme v grafu na obrázku níže. Zde je již čas nad liquidem značně vyšší a splňuje optimum, které výrobce pasty uvádí pro co nejnižší výskyt voidů a ideální pevnost. Bohužel zde ale pozorujeme výrazný nárůst teploty na povrchu desky, která působí na LED diody. Ty mají dle výrobce deklarovanou odolnost 260 °C po dobu nižší než 10 sekund. Jak můžeme z dat vyčíst, na termočlátku byla teplota vyšší než 255 °C více než 20 sekund. To může mít za následek nižší spolehlivost diod.

Z tohoto důvodu se bude další praktická část zabývat možným přechodem na SnBi pájku, která by tepelnou zátěž LED zmírnila.

Výsledkem by mohl být profil, který bude splňovat technologické limity jak pájecí pasty, tak i diod. V důsledku nižšího počtu voidů a dostatečného času pro vytvoření spoje by se také měla zvýšit mechanická odolnost výsledného produktu.

Před vyvozením jakýchkoliv závěrů je třeba říci, že při pozdější analýze se ukázalo, že termočlánek číslo 5, tedy pravý zadní, nebyl správně usazen. V předchozích informacích tak jsou brány v potaz pouze informace z ostatních termočláneků.

Výkyvy teplot (příčné i podélné) byly opět viditelné v nastavování SnBi profilu, ze kterého byl tento termočlánek pro vyšší přesnost zcela vyloučen, a rozmístění ostatních upraveno tak, aby bylo měření teplot rovnoměrné a zaznamenaný podélný i příčný profil měl co nejvyšší vypovídací hodnotu.



Obr. 19 Teplotní profil SAC pájky Encorel při průchodu pouze měřicí aparatury

4.2 SnBi pasta – nastavení a optimalizace teplotního profilu

4.2.1 Výchozí stav

Pro návrh pájecího profilu SnBi pasty byl použit graf, který je dodáván spolu s pastou od výrobce. Ten obsahuje délku přehřevu včetně maximální strmosti stoupání, dobu vyrovnání a zejména pak teplotu tání pasty, maximální teplotu procesu a doporučenou dobu nad liquidem. Díky těmto informacím byl sestaven prvotní profil, jehož přeměření jsme se mohli posunout dál.

Vstupní parametry procesu byly následující:

Pasta Qualitek Delta 670 Sn42Bi58 s hmotnostním podílem kovu 88 % a velikostí částic stejně jako u SAC pasty 25–45 μm . Expirace pasty do září 2017. Doporučená aplikace pasty je šablonový tisk.

Přehřev na 100 °C s maximální rychlostí ohřevu 3 °C za sekundu.

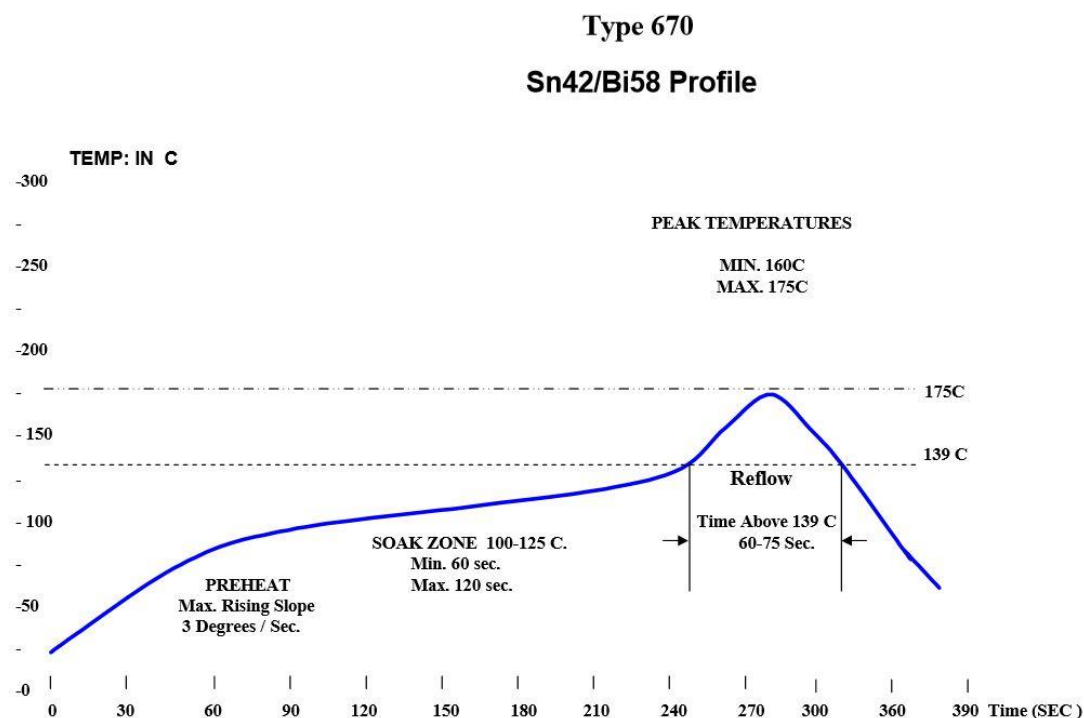
Zóna vyrovnání v rozmezí 100–125 °C s minimální délkou trvání 60 sekund a maximální 120 sekund.

Teplota tání pasty 139 °C.

Minimální vrcholová teplota 160 °C a maximální 175 °C.

Celkový čas nad liquidem (139 °C) v rozmezí 60–75 sekund.

Vizualizaci profilu dle výrobce můžeme vidět na obrázku níže:



Obr. 20 Ideální profil dle technického listu výrobce SnBi pasty

Z výše uvedených údajů je zřejmé, že pasta má relativně úzké procesní okno, které je nutné dodržet při navržení profilu. Vzhledem k tomu, že společnost Osmont disponuje 4zónovou pecí, je třeba nejen teplotně dodržet procesní okno, ale i vhodně manipulovat teplotou v oblastech přechodů jednotlivých zón, čímž dosáhneme jejich prodloužení potažmo zkrácení, jak si ukážeme v následujících odstavcích.

4.2.2 Návrh a optimalizace teplotního profilu SnBi pasty

Obecně platí, že profil je vhodné nastavovat od nižších teplot k vyšším, neboť ohřev pece trvá menší dobu a je lineárnější než následné chladnutí již přehřáté pece. Toho se v tomto případě bohužel nepovedlo docílit, vzhledem k poklesům teploty během SAC profilu (viz předchozí kapitola) byl reálný pokles teploty na desce o poznání nižší. Prvotní profil si tedy můžeme prohlédnout na následujícím grafu.

Nastavení zón měření 1:

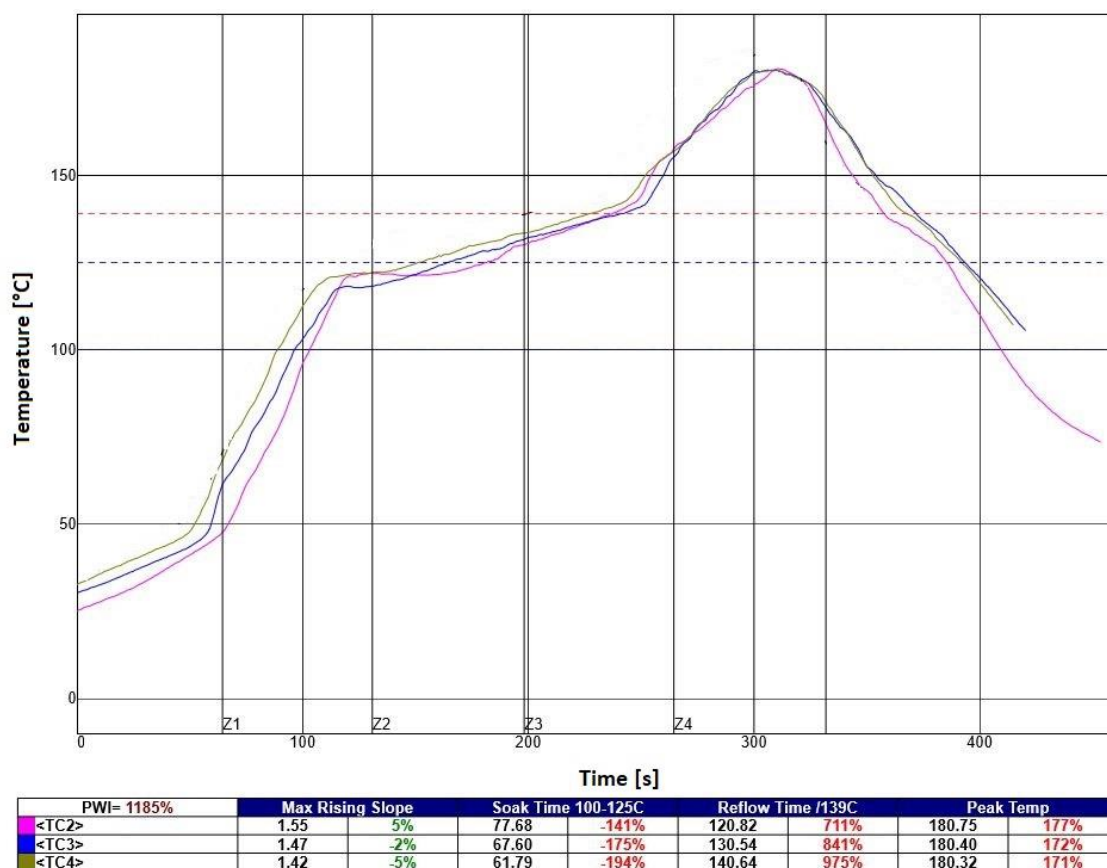
Zóna 1: 125 °C

Zóna 2: 130 °C

Zóna 3: 140 °C

Zóna 4: 190 °C

Rychlost dopravníku 20 cm/min



Obr. 21 Prvotní nastavení profilu SnBi

Jak je z grafu patrné, nastavené teploty bylo nutné snížit. Maximální teplota 175 °C byla překročena o necelých 6 °C. Závažnější byla ovšem doba nad liquidem, která dosáhla téměř dvojnásobku doporučené hodnoty. Předehřev a prodleva v zóně vyrovnání teplot byly v procesních mezích.

Pro další měření tak bylo potřeba razantně zkrátit dobu nad liquidem a snížit maximální teplotu. Toho jsem se pokusil docílit tak, že jsem snížil teplotu zóny 4, což by mělo mít za následek jak snížení maximální peak teploty, tak zejména pokles doby, po kterou je teplota vyšší než 139 °C. Dále jsem snížil teplotu zóny 3, která by měla mít vliv na začátek zóny 4, té by pak rychlost ohřevu na teplotu přetavení měl trvat déle. Výsledky měření takto upraveného profilu vidíme níže:

Nastavení zón měření 2:

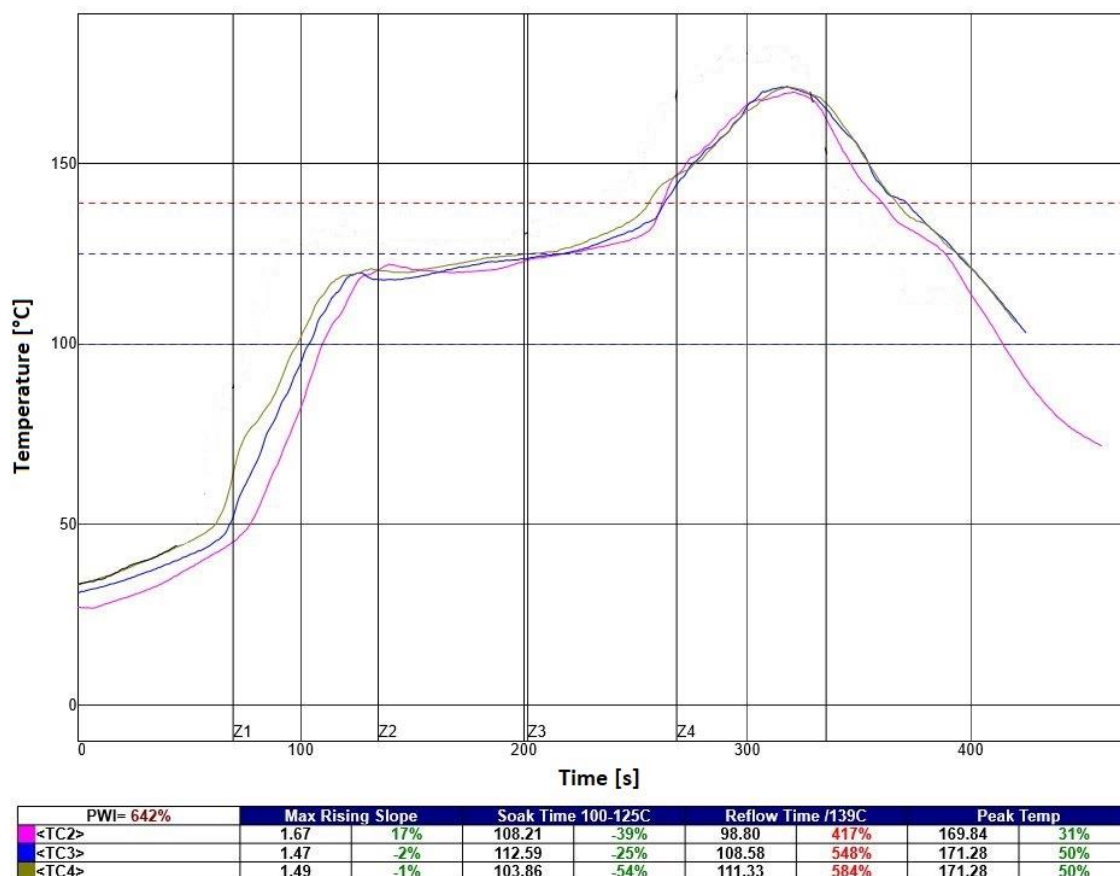
Zóna 1: 120 °C

Zóna 2: 125 °C

Zóna 3: 130 °C

Zóna 4: 180 °C

Rychlost dopravníku 20 cm/min



Obr. 22 Výsledek měření profilu po první změně

Jak vidíme ze záznamového protokolu, maximální teplota je nyní v mezích procesního okna. Stejně tak prodleva v zóně vyrovnání teplot a rychlost ohřevu je v pořádku. Bohužel čas, po který je na termočláncích teplota vyšší, než je teplota přetavení, je stále velmi vysoký. Vzhledem k optimálním hodnotám v ostatních zónách jsem se rozhodl dále výrazně neměnit teploty a pokusil jsem se dobu přetavení zkrátit zrychlením dopravníku. Tím se zkrátí jak prodleva v zóně přetavení, tak i ve vyrovnávací zóně. Ta má ovšem od procesní hranice 60 sekund stále dostatečnou toleranci. Pro snížení dopadu rychlosti na strmost přehřevu jsem se ovšem rozhodl snížit teplotu prvních dvou zón.

Nastavení zón měření 3:

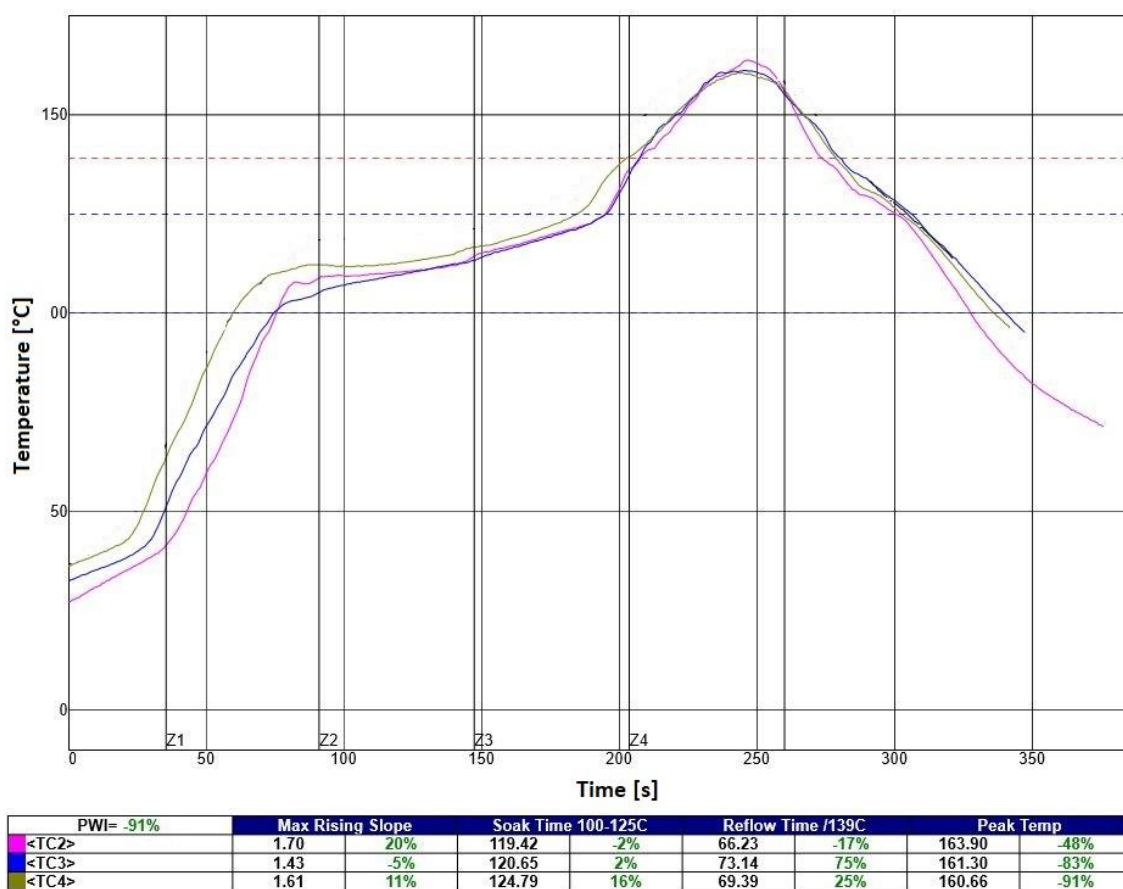
Zóna 1: 110 °C

Zóna 2: 115 °C

Zóna 3: 125 °C

Zóna 4: 178 °C

Rychlost dopravníku 26 cm/min



Obr. 23 Finální pájecí profil pro SnBi pastu

Pokud se podíváme na výsledný profil, vidíme, že všechny sledované parametry jsou již v tolerancích daných výrobcem pasty. Termočlánky na desce jsou rozmístěny zleva doprava odpředu dozadu, tím můžeme posoudit i příčný teplotní profil během průchodu měřicího přípravku pecí. Největší rozdíly jsou na začátku procesu během fáze předehřevu. Tento jev si můžeme vysvětlit omezenou schopností pece kompenzovat vliv ochlazení první zóny.

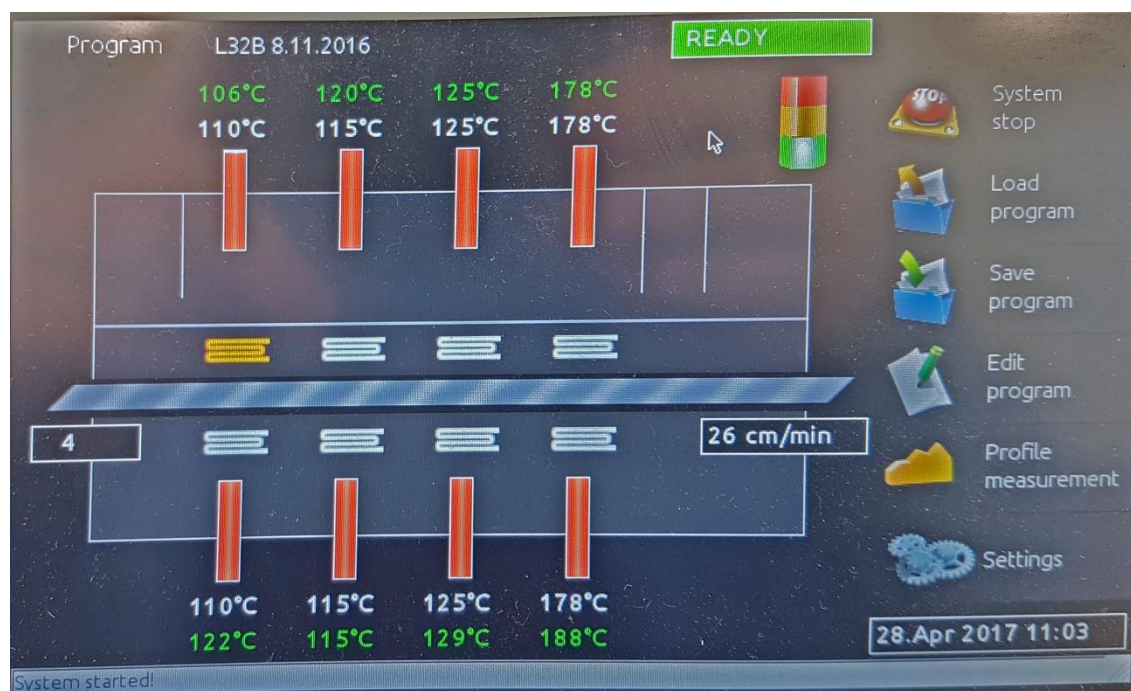
Zároveň má měřicí přípravek nemalou tepelnou kapacitu, která odebírá svým ohřevem teplo. To dává signál k opětovnému ohřevu, což můžeme sledovat právě na zadním termočláнку.

V průběhu měření jsme se také setkali s významným problémem, který provází SnBi pájení v použité peci. V předchozím odstavci jsme si řekli, jak probíhá vyrovnávání teplot. Pec se postupně ochlazuje až do hranice, kdy začnou tělesa opět více topit, aby ztráty kompenzovaly. Tím se dočasně zvedne teplota v peci nad nastavenou mez a poté dochází opět k chladnutí.

Tento mechanismus má bohužel za následek, že teplota v jedné zóně v čase klesá a stoupá kolem nastavené teploty. Není tak zajištěn stabilní profil. U vyšších teplot je rozdíl snáze zanedbatelný, např. oscilace v rozmezí 10 °C na teplotě 270 °C je 3,7 %, stejná oscilace teploty v našem případě 178 °C dělá už 5,6% výkyvy. V praxi jsem během měření zpozoroval nejvyšší výkyv o -5 °C od nastavení až po +10 °C, což je oscilace v rozmezí 8,4 %. To už lze považovat za významné ovlivnění procesu.

Ve fázi předehřevu jsou pak změny vzhledem k nízké teplotě ještě markantnější a přesahují 10 %.

Nejvyšší naměřený výkyv můžeme vidět na následujícím obrázku. Všimněme si zejména reálných teplot na spodní části pece, kde namísto 110 °C v zóně 1 je 122 °C a namísto 178 v zóně 4 je 188 °C.



Obr. 24 Rozdíly mezi nastavenou a reálnou teplotou v přetavovací peci

Je otázkou, nakolik se mohou produkty co do kvality lišit během procesu, slibným faktem ovšem je, že společnost Osmont již zainvestovala do nového vybavení a tento proces tak bude možné přenést do zcela nové a kvalitnější pece.

5 ANALÝZA A HODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Připravené vzorky, které jsou popsány v předchozí kapitole, byly analyzovány pomocí nedestruktivních a destruktivních metod. Mezi nedestruktivní patří rentgenový tomograf, mezi destruktivní pak mikrovýbrus a následná inspekce pod optickým a elektronovým mikroskopem a provedení odtrhových zkoušek. V této kapitole si o každé z těchto metod řekneme několik slov a poté zhodnotíme dosažené výsledky.

5.1 Vizuální hodnocení LED panelu po přetavení

Tato krátká, leč významná kapitola se zabývá inspekcí LED panelů po zapájení. Panel zapájený SAC teplotním profilem ve všech případech vykazuje prohnutí desky o 0,6 cm. Toto prohnutí je následkem působení teploty na desku během procesu přetavení. Důvodů může být hned několik, mezi nejčastější příčiny však patří nepřesná geometrie jednotlivých vrstev desky a různá teplotní roztažnost použitých materiálů a zejména pak výrazné překročení bodu skelného přechodu.

Naopak u SnBi pasty a teploty nepřesahující 180 °C nepozorujeme prohnutí téměř žádné. To je velice podstatné pro pevnost spojů, neboť se zde velice efektivně eliminuje vnitřní pnutí ve spoji, které trvá po celou dobu životnosti desky. Minimální průhyb desky můžeme přisuzovat nedostatečné teplotě pro dosažení skelného přechodu použitých materiálů.

Toto pnutí je velice významný činitel pro rozvoj mikroprasklin a mechanické poškozování spoje během teplotních cyklů, které deska v provozu absolvuje.

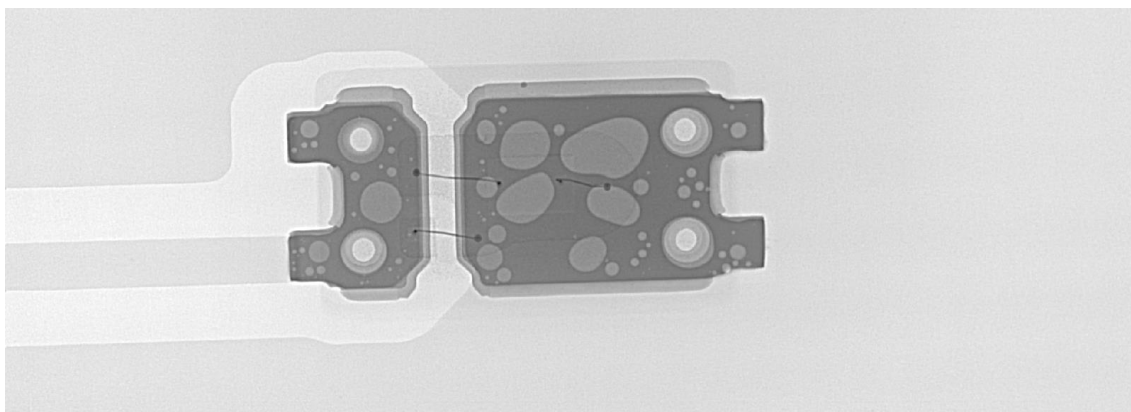
5.2 Rentgenová analýza

Pro rentgenovou analýzu byl využit rentgenový tomograf Nordson Dage Ruby s maximálním udávaným rozlišením 0,5 μm . Díky němu můžeme nedestruktivně zkoumat spoje před a po procesu stárnutí a porovnat formování spoje na jednotlivých vzorcích.

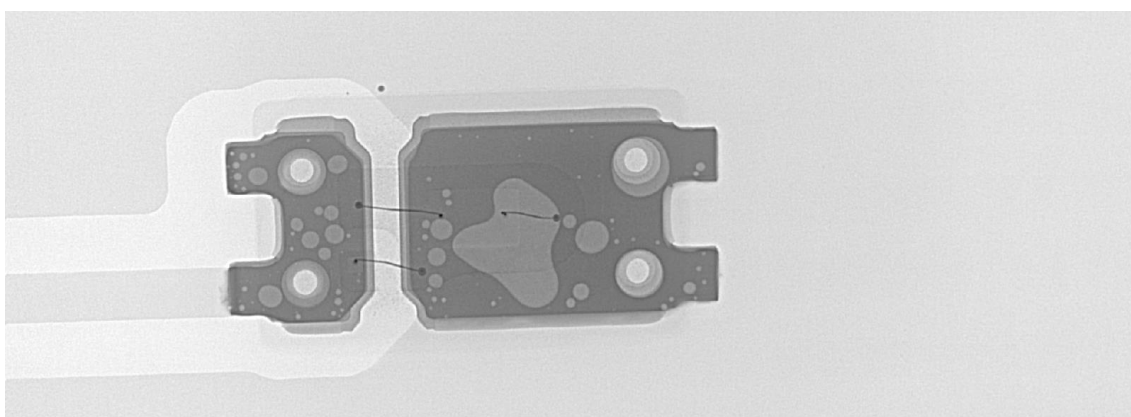
Na následujících obrázcích pod textem a v příloze můžeme vidět jednotlivé diody. Rozdíly v kvalitě zapájení nejsou nikterak značné, jedná se o průměrnou podobu spoje.

Na stejném rentgenovém tomografu byly rentgenovány postupně všechny vzorky, tedy původní produkt, poté LED panel opět s SAC pájkou, ovšem s upraveným profilem, který více odpovídá specifikaci výrobce. A závěrečné snímky budou věnovány opět SnBi pastě.

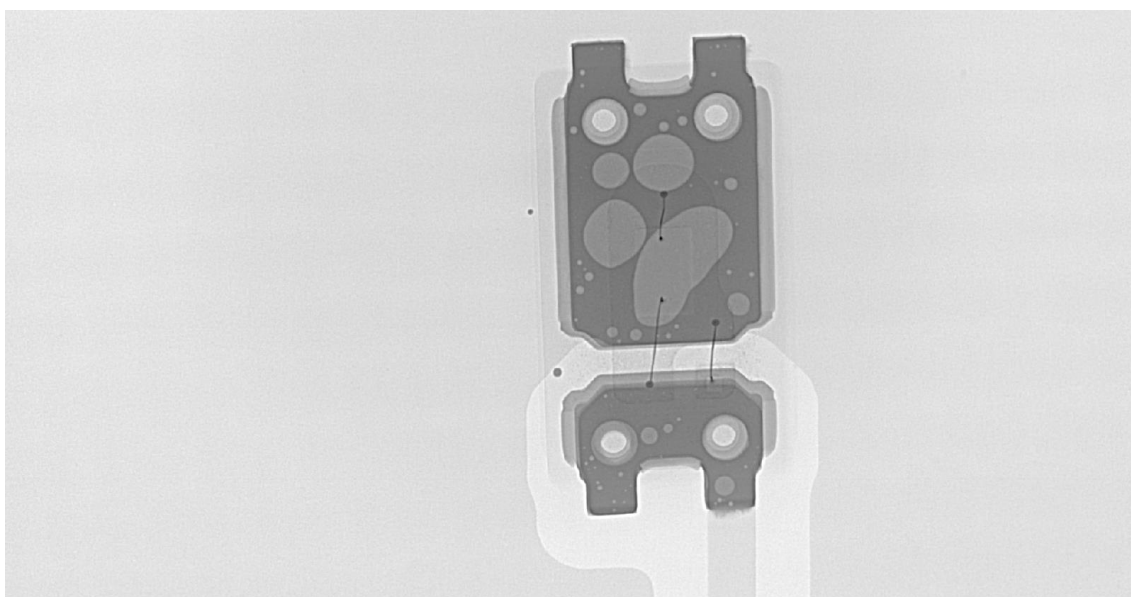
5.2.1 Rentgenové snímky SAC 1. generace



Obr. 25 Vzhled pájeného spoje mezi diodou a deskou



Obr. 26 Pájený spoj mezi diodou a deskou – větší void



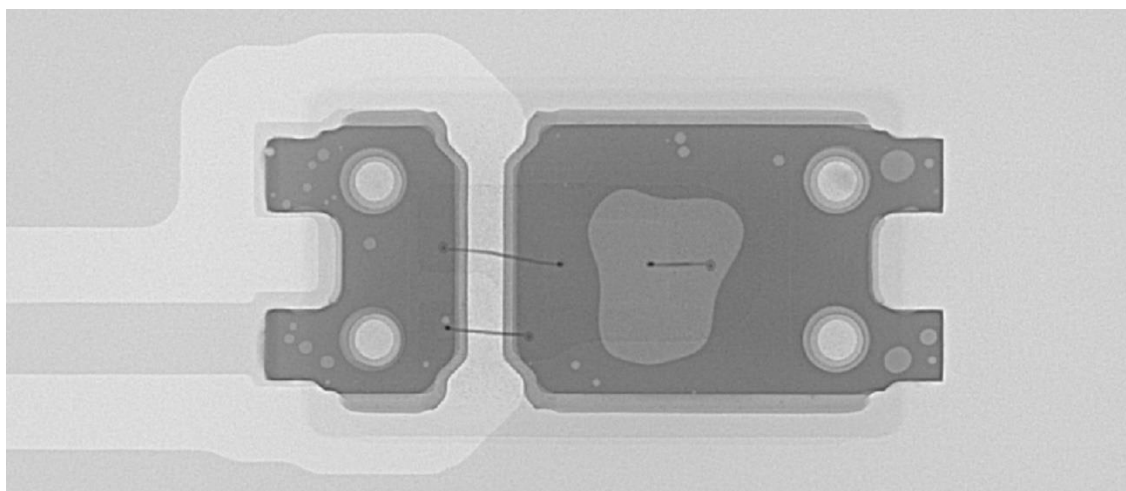
Obr. 27 Pájený spoj mezi diodou a deskou – větší plocha zaujímáná voidy

Jak můžeme vidět, spoje jsou z velké části vyplněny voidy, tedy dutinami zaplněnými vzduchem či zbytky tavidla.

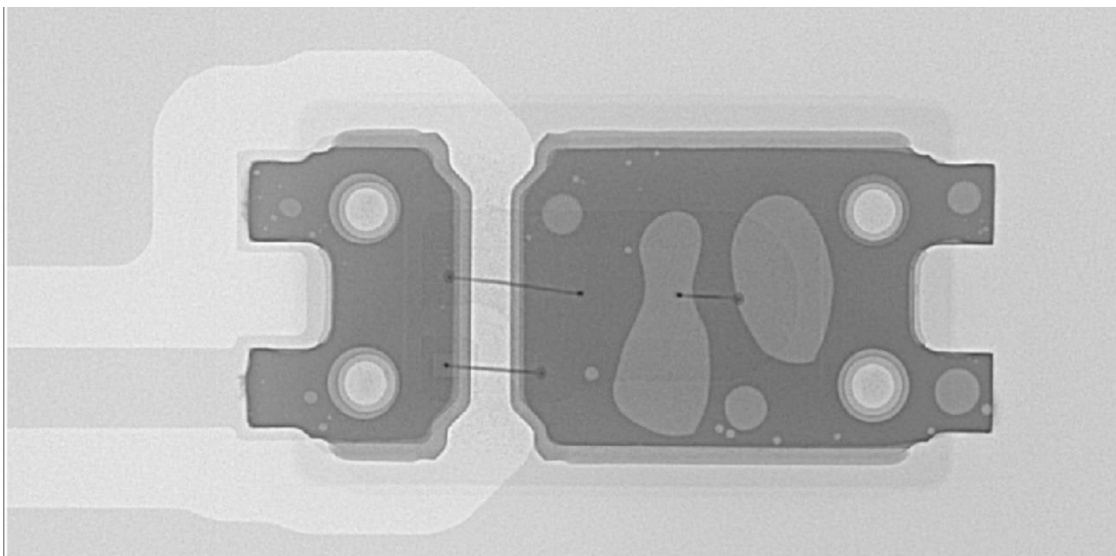
Vzhledem ke značné ploše, kterou zabírají, by bylo vhodné zjistit příčinu vzniku. Jednou z možností je, že pro zformování spoje nebylo nanášeno dostatečné množství pájecí pasty, popřípadě nebyl správně spočítán zbytkový objem pájky po odpaření tavidlové části. Pro případný lepší odvod plynů vzniklých během pájení je možné změnit design měděné plošky, kterou lze doplnit například o drážkování. Tím by se ovšem snížila efektivita přenosu tepla z diody na desku.

S jistotou můžeme říci, že spoj bude mít nižší pevnost, což může mít za následek, že vlivem stárnutí spojení zeslábně natolik, že LED se uvolní. Dále může docházet k nadměrnému ohřevu vlivem nerovnoměrného rozložení proudové hustoty, a tedy dalšímu stárnutí spoje.

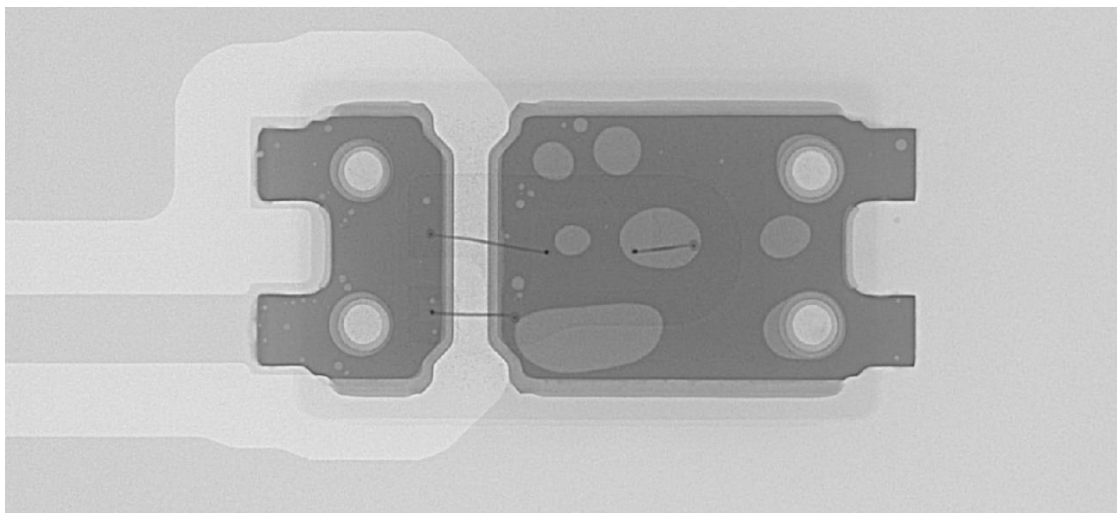
5.2.2 Rentgenové snímky SAC 2. generace



Obr. 28 Pájený spoj s upraveným SAC profilem – jeden rozsáhlý void



Obr. 29 Void podobného rozsahu jako předchozí, rozdělený na dva menší

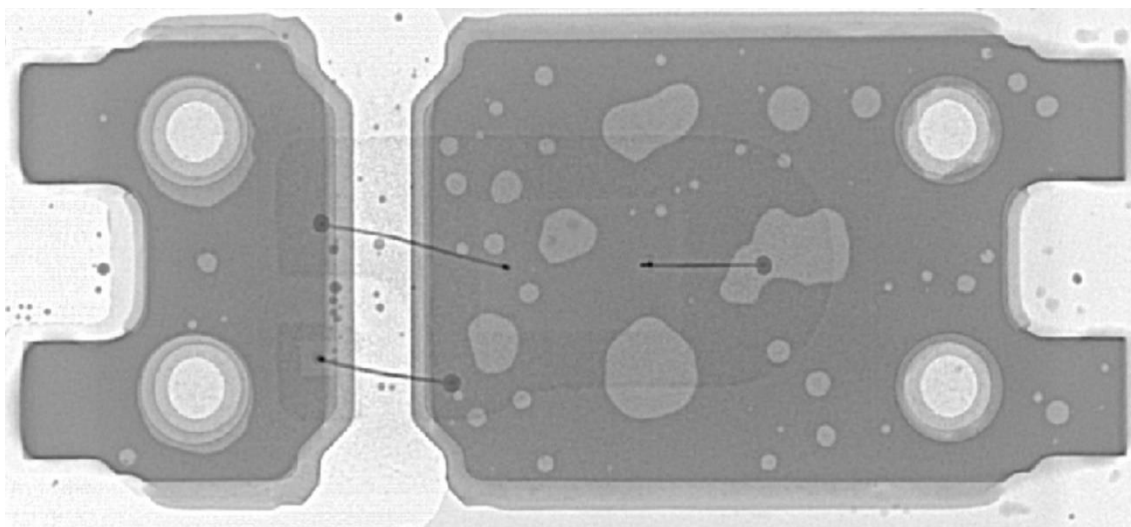


Obr. 30 Několik menších voidů – problematické umístění u okraje

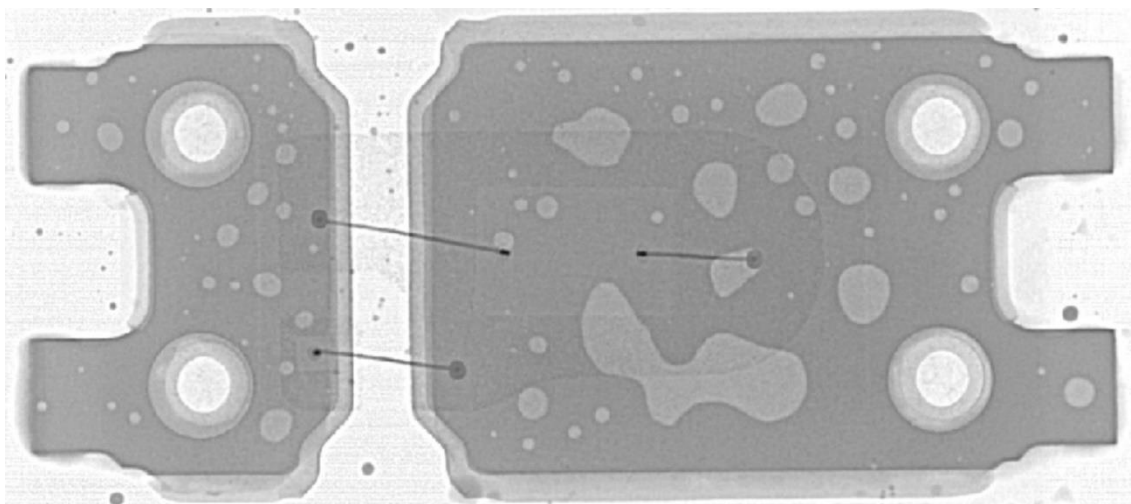
V této sérii snímků můžeme vidět velice podobné voidy jako v předchozí. Opět pod rentgenem sledujeme větší voidy, které zabírají podstatnou část spoje. IPC norma stanovuje, že velikost jednoho voidu nesmí překročit 25 % povrchu spoje, celkem pak v součtu nepřekročí 50 %. Tyto podmínky jsou i v tomto případě splněny. Reálným rizikem je ovšem jejich umístění, neboť na fotografii výše vidíme void umístěný na okraji spoje, kde je tak velikost pájky minimalizována. Toto umístění je kritické pro vývoj prasklin v čase. To je důvod, proč se snažíme o minimalizaci voidů. Menší voidy toto riziko nepředstavují, nebo je zanedbatelné.

Problematické jsou pak zejména voidy umístěné při okraji LED, neboť takto oslabená část má nejvyšší šanci být zdrojem mechanického odloupenutí diody.

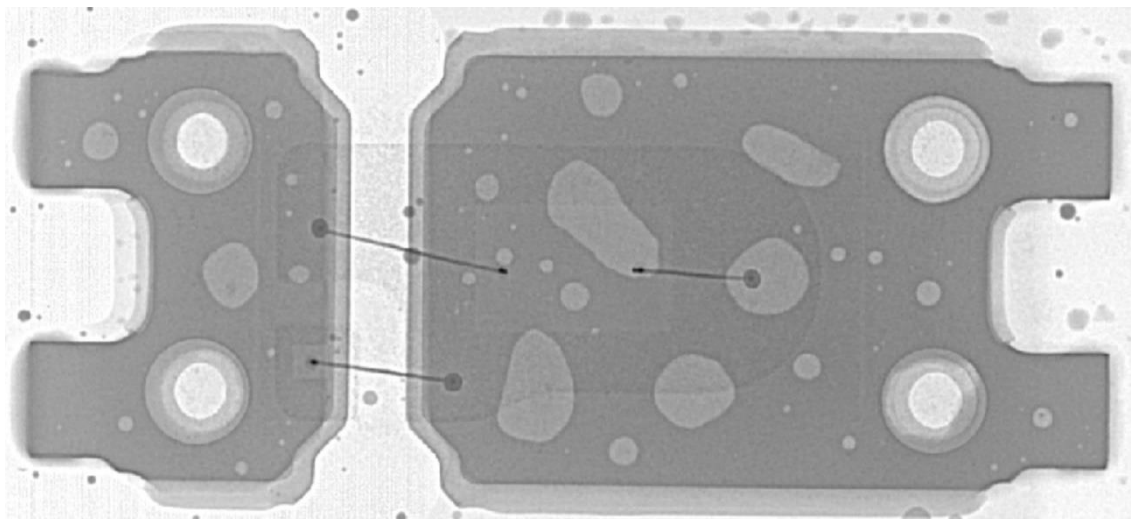
5.2.3 Rentgenové snímky SnBi



Obr. 31 LED zapájená pomocí SnBi pasty – vidíme větší množství menších voidů a kuličky pájky v okolí spojů



Obr. 32 Jeden větší void a řada menších



Obr. 33 Menší voidy

Výsledek rentgenové analýzy prokázal, že SnBi pasta netvoří velké voidy, jaké jsme viděli u SAC pasty. Na většině vzorcích se objevuje větší množství menších voidů, které jsou ovšem mnohem méně problematické jak z pohledu pevnosti spoje, tak i z pohledu zahřívání a vodivosti.

Naopak zde pozorujeme větší množství artefaktů ve formě malých kuliček po obvodu diody. Ty nedosahují dostatečných velikostí pro vznik elektrických vad, ale i tak jsou nežádoucím rizikem.

Tento jev může mít několik příčin, od vlivu pájecí pasty, použitých tavidel, aktivátorů až po nastavení šablonového tisku, který se nikterak pro SnBi pastu neupravoval, ačkoliv je více než pravděpodobné, že SnBi pasta má rozdílnou viskozitu a reologické vlastnosti.

Pro podrobnější prozkoumání problému by také bylo vhodné vyzkoušet experiment ještě s další SnBi pastou s rozdílným složením.

5.2.4 Diskuze výsledků

Z rentgenových snímků je patrné, že SnBi pasta má nižší tendenci tvořit prostorově výrazné voidy, zatímco SAC pasta je tvoří v obou generacích téměř stejnou měrou.

Použité obrázky jsou samozřejmě pouze zlomkem celkového rozsahu, na deskách bylo pořízeno více než 300 snímků, které jsou k dispozici na příloženém DVD či v obrazové příloze. Je ovšem třeba zdůraznit, že vybrané vzorky nijak výrazně nevybočují.

Pokud budeme hodnotit pouze voidy a jejich velikost, pak SnBi pasta vypadá pro použití velice nadějně. Lze očekávat vyšší pevnost spoje, menší lokální zahřívání v oblastech, kde pasta téměř chybí a proudová hustota tak dosahuje vyšších hodnot, a v neposlední řadě i elektrickou vodivost.

Naopak nebyly jednoznačně vysvětleny příčiny vzniku kuliček v okolí komponent při použití SnBi pasty. Ať už se jedná o vliv pájecí pasty nebo případná eliminace vyžaduje úpravu metodiky tisku pájecí pasty, bylo by vhodné tento problém prozkoumat do větší hloubky a věnovat mu větší prostor.

5.3 Odtrhové zkoušky

Po navržení a odladění pájecího profilu (viz předchozí kapitola) se vytvořila poslední sada vzorků. V této fázi praktické části diplomové práce je třeba dokázat, zda jsou LED zapájené pomocí SnBi pasty mechanicky odolnější než LED, které jsou zapájené pomocí SAC pasty.

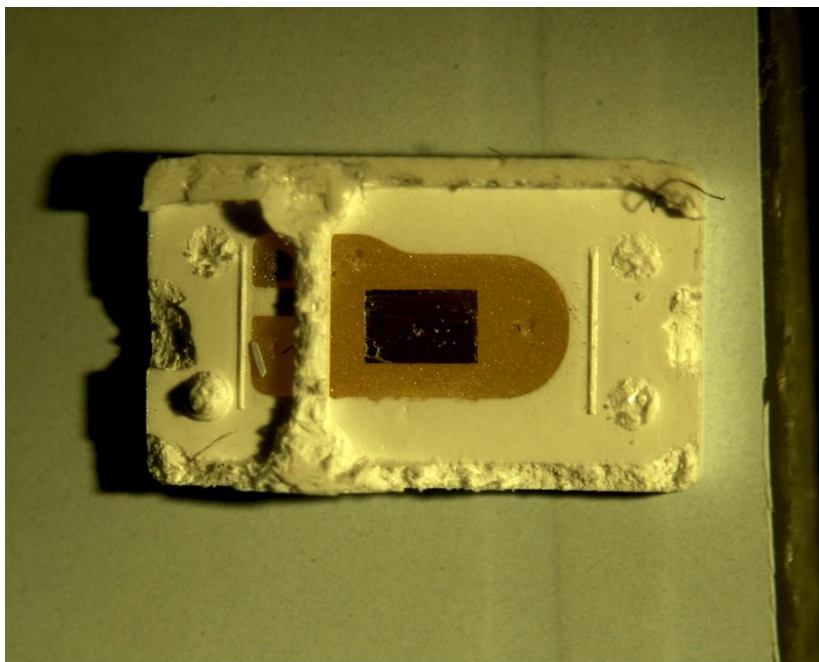
K tomuto měření byl použit odtrhový stroj Dage PC 2400 z laboratoře FEKT VUT.

Vzhledem k rozměrům zkoumaných desek a velikosti upevňovacího stolku bylo potřeba nejprve desku rozřezat na cca 10 cm dlouhé úseky, které se pak do odtrhového stroje umístily. Pro přesnost měření je důležité vybrat hrot, který odpovídá velikosti trhaných komponent. Tak lze zaručit rovnoměrné rozložení sil.

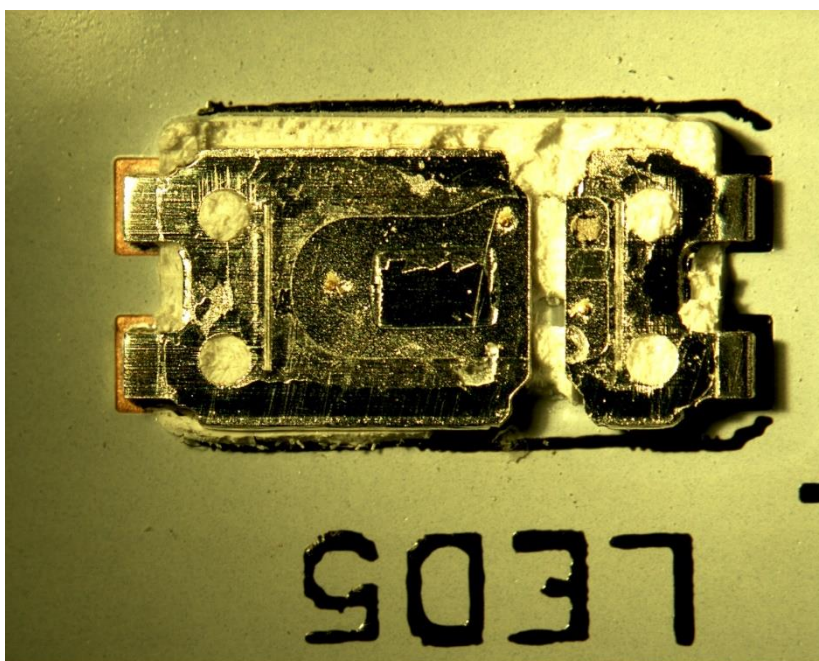
Během odtrhových testů bylo bohužel zjištěno, že všechny odtrhované vzorky jsou mechanicky pevnější než plastové pouzdro diody. Nejedná se o nijak překvapivé zjištění, vzhledem ke konstrukci celého řešení, která je nejlépe vidět na rentgenových snímcích výše, je zřejmé, že LED je zapájena na relativně velké ploše.

Z každého vzorku bylo odtrženo 25 LED, tedy celkem 75 na všech třech vzorcích. Všechny testy dopadly stejně. Bylo odtrženo plastové pouzdro a jak kovový vnitřek LED, tak i pájený spoj zůstal nepoškozený na desce.

Vzhled preparátů můžete vidět na fotografiích níže:



Obr. 34 Odtržená vrchní část diody



Obr. 35 Spoj a vnitřek diody na desce po odtržení

Výsledkem této zkoušky je tak minimálně potvrzení, že ani SAC ani SnBi pasta neposkytuje pájený spoj, který by byl pevnostně méně kvalitní než tělo samotné diody, a to ani po stárnutí, kterému byla druhá generace SAC desek dle zadání práce vystavena.

5.4 Mikrovýbrus

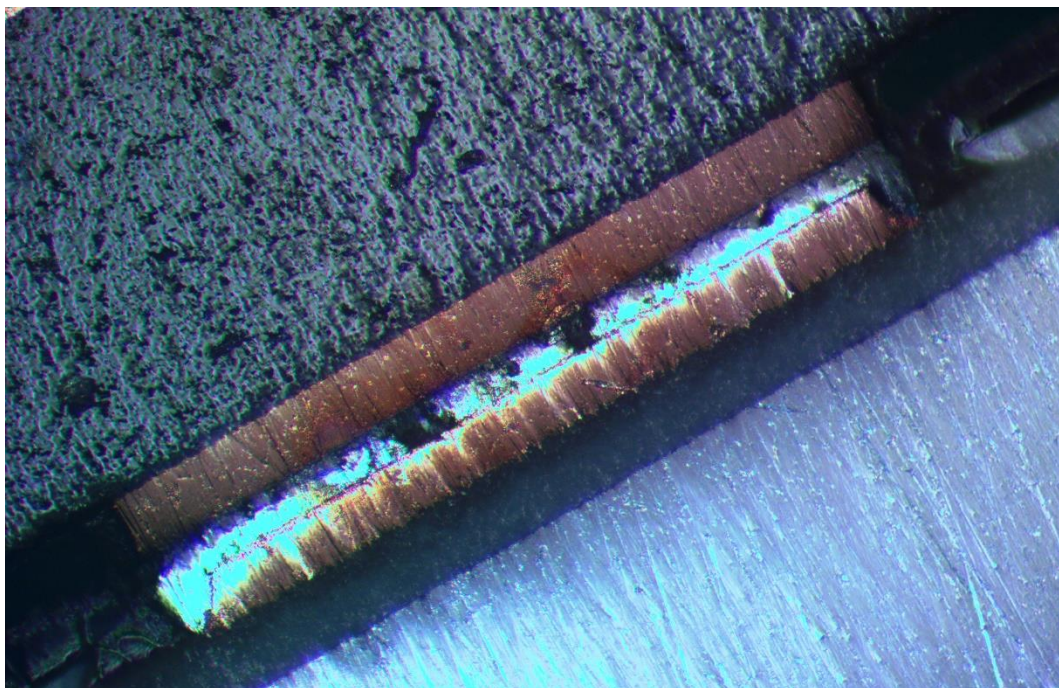
5.4.1 Tvorba mikrovýbrusu

Tvorba mikrovýbrusu probíhala na Ústavu elektrotechnologie VUT. Nejprve bylo potřeba vyříznout z desky kotoučovou rozbruskou část desky s LED. Ta byla poté zalita do metylmetakrylátové pryskyřice, jinak také dentakrylu. Dentakryl se připravuje smícháním práškové a tekuté složky a následnou homogenizací. Po zalití čipu do formy se nechal dentakryl do druhého dne vytvrdit.

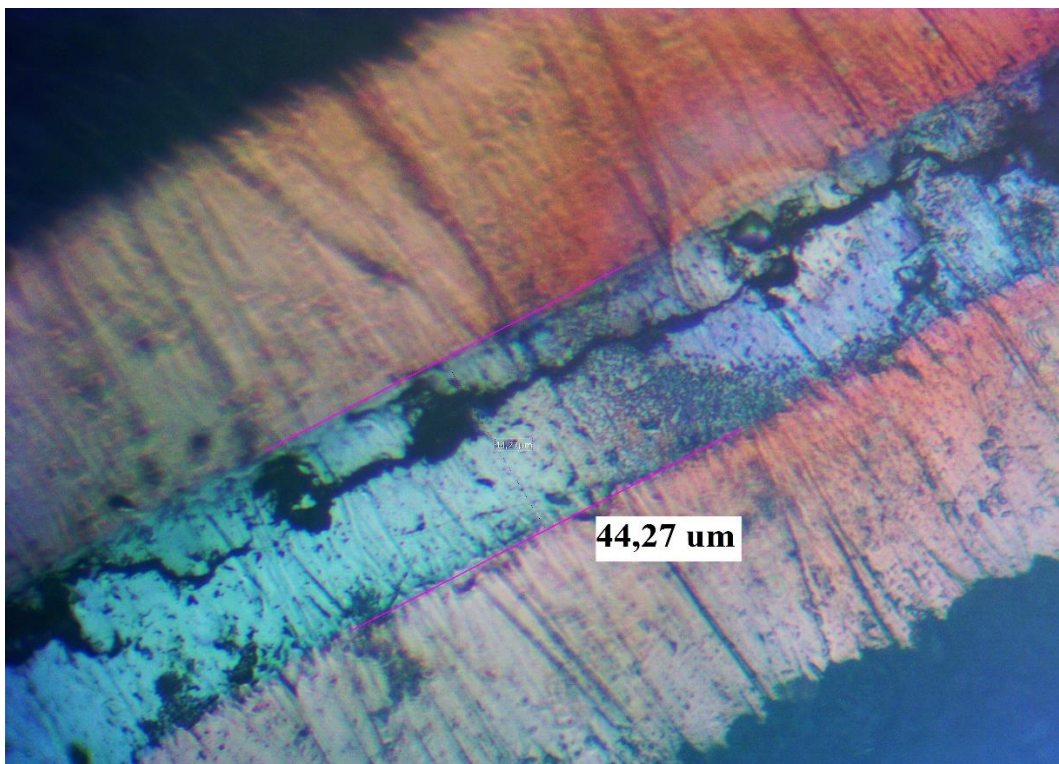
Po vytvrdnutí hmoty a oddělení z formy následovalo samotné broušení. To probíhalo za mokra a jako brusné médium sloužily brusné papíry o zrnitosti 600 a 1200. Ty se nasadily na brusné kotouče. Broušení bylo prováděno převážně brusným papírem o zrnitosti 1200 s velmi častou optickou kontrolou pomocí mikroskopu.

Po dostatečném vybroušení bylo potřeba mikrovýbrus vyleštit. K tomu sloužily sametové leštící kotouče, isopropyl alkohol (IPA) pro zvlhčení a diamantová pasta. Pro naleptání struktury byl použit Nital, tedy roztok 5 ml HNO_3 a 100 ml 95% methanolu. Výsledný mikrovýbrus byl pozorován a focen pomocí optického a elektronového mikroskopu. [7]

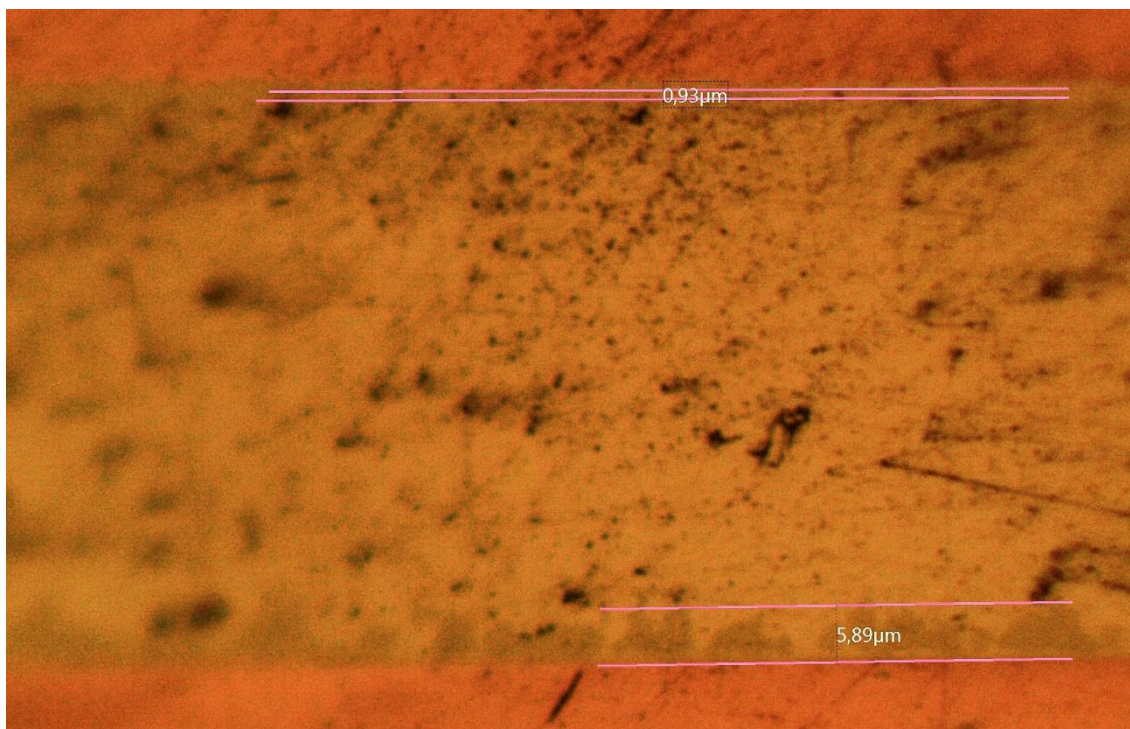
5.4.2 Vizuální hodnocení mikrovýbrusů optickým mikroskopem



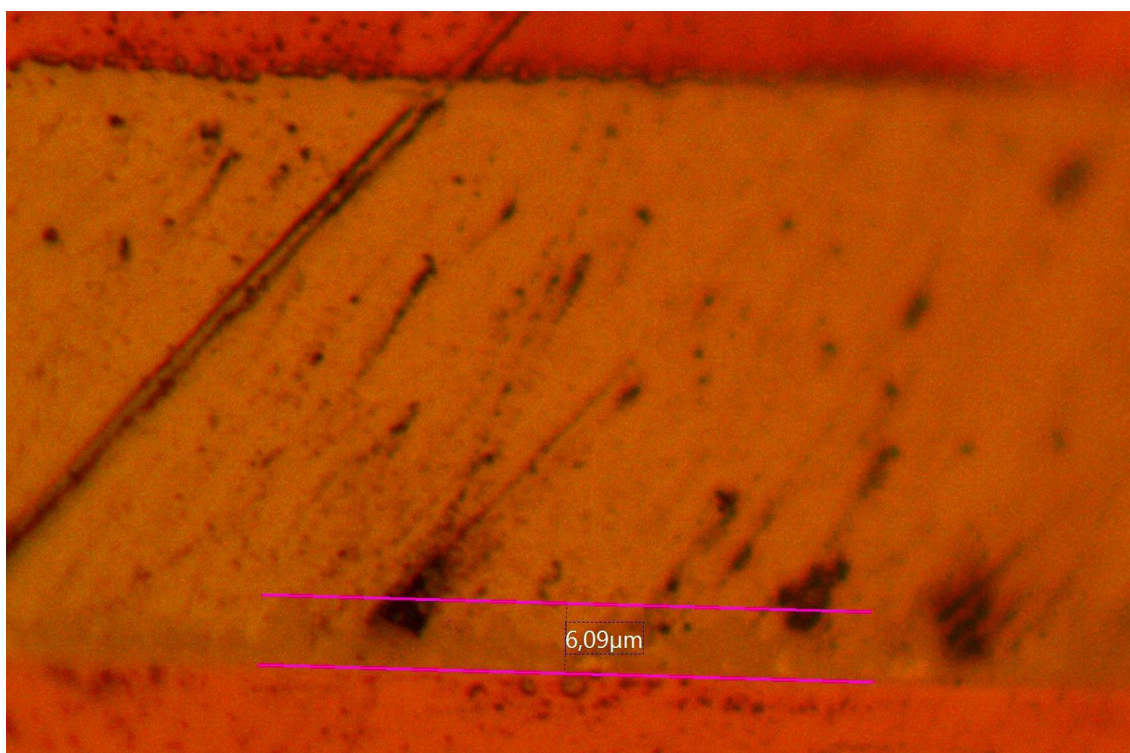
Obr. 36 Oddálený mikrovýbrus – můžeme vidět voidy



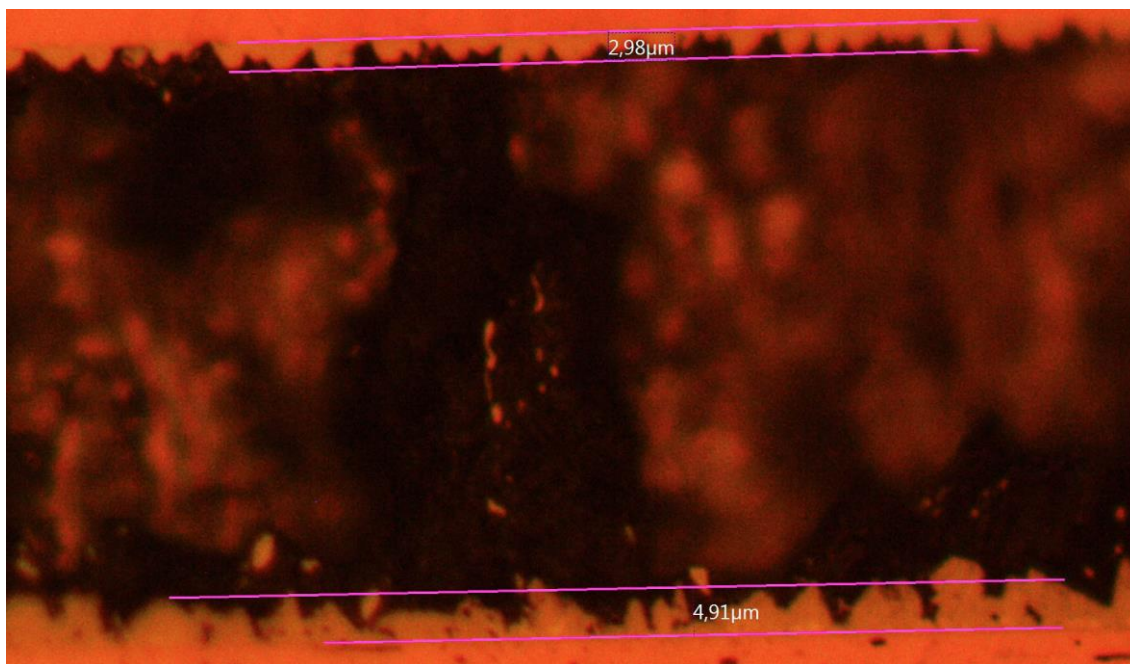
Obr. 37 Mikrovýbrus po dalším leštění – vytvořená prasklina – vzorek SAC



Obr. 38 SAC pájka – intermetalická vrstva kolísá od 1 do 6 µm

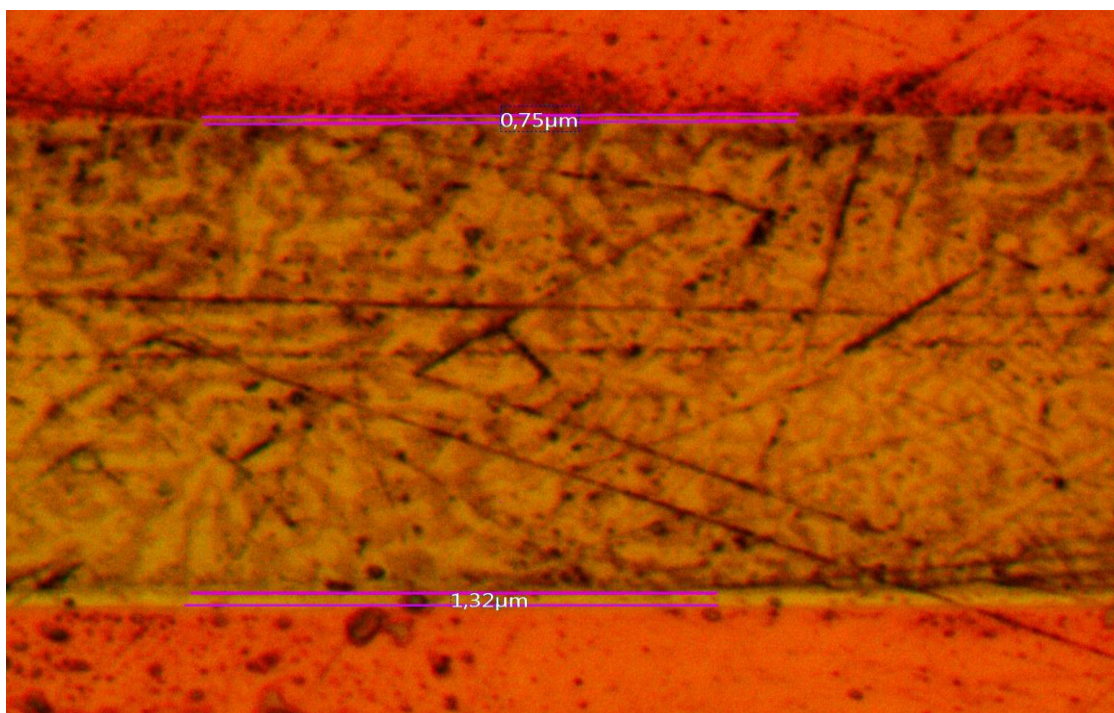


Obr. 39 SAC pasta – intermetalická vrstva se tvoří pouze na jedné straně spoje, na druhé vidíme mikrovoidy

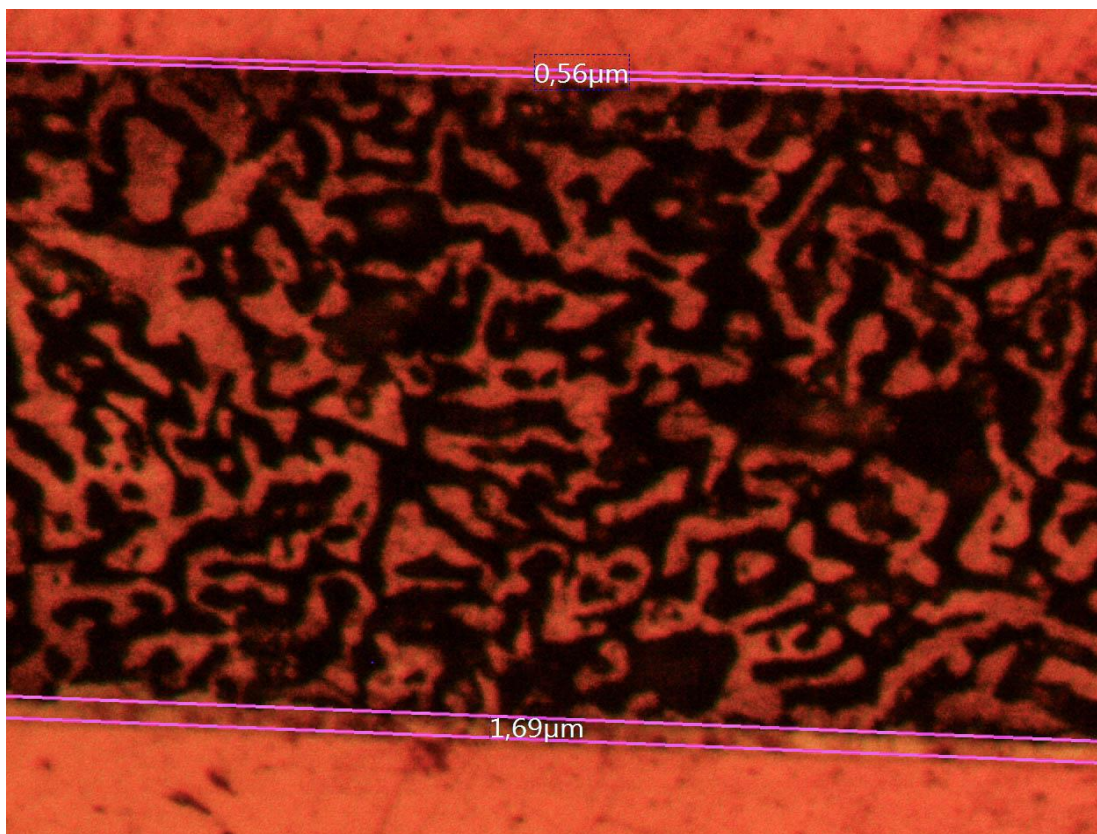


Obr. 40 SAC – aplikace mikroleptu – zvýraznění IMC vrstvy

Na předchozích obrázcích vidíme vzhled spoje pod metalografickým mikroskopem. Na vrchní straně spoje se tvoří minimální šířka intermetalické vrstvy, po aplikaci mikroleptu kyselinou dusičnou je struktura již lépe pozorovatelná. Mikrovoidy na obrázku výše mohou mít negativní vliv na pevnost spoje, neboť tvoří souvislou vrstvu v jedné rovině, ve které je spoj nejslabší.



Obr. 41 SnBi pájka – intermetalická vrstva na obou stranách spoje – 1,32 a 0,75 µm



Obr. 42 Druhý vzorek SnBi pájky – aplikace mikroleptu

Na SnBi pájce vidíme, že intermetalická vrstva je podstatně užší, což jsme předpokládali již v rozboru teoretické části práce. Této vrstvy se totiž účastní pouze cín a měď z plošek, bismut tvoří samostatné ostrůvky, které vidíme jako charakteristickou kresbu. Z toho důvodu je zde méně kovu, který by se na růstu IMC vrstvy podílel.

5.4.3 Diskuze výsledků

Na fotografii prvního mikrovýbrusu SAC pájky můžeme vidět, že spoj obsahuje dutiny a jejich podobu. V průběhu dalšího leštění pro elektronovou mikroskopii se mezi voidy postupně začala šířit prasklina, která nakonec celý spoj degradovala.

Z toho můžeme vypožorovat, že nedostatek pájky ve spoji způsobuje jeho křehkost. Vibrace, kterým byl spoj v průběhu broušení vystaven, způsobily vznik trhliny mezi voidy, která se následně rozšířila do celého spoje.

Kvůli těmto výsledkům bohužel nemáme k dispozici vzorový snímek spoje, ale prokázalo se, že spoj je opravdu křehký a může být snadno poškozen. Vzhledem k nálezům by bylo také vhodné vzorky podrobit vibračním zkouškám a poté provést opětovné vyhodnocení všech testů.

Ze snímků je také vidět, že šířka spoje je přibližně 44 μm , z toho zabírá přibližně 7 μm intermetalická vrstva.

Na dalších snímcích SAC jsme mohli pozorovat také postupné zvýraznění IMC vrstvy mikroleptem, který byl připraven pomocí kyseliny dusičné. Nyní vidíme, že i na těchto vzorcích druhé generace je šířka intermetalické vrstvy stejně velká. Při pozorování ovšem také vidíme mikrovoidy, které jsou podstatným rizikem. Vzhledem k tomu, že tvoří souvislou rovinu oslabeného spoje, mohou se snadno stát médiem pro šíření prasklin a ovlivnit tak mechanickou pevnost spoje.

SnBi pasta dle předpokladu tvoří užší intermetalickou vrstvu, což naznačuje nižší iniciační pevnost spoje, ale zároveň eliminuje nežádoucí vlastnosti intermetaliky, jako je křehkost a snadné prostředí pro šíření prasklin. Na rozdíl od SAC zde také nepozorujeme mikrovoidy. Celkově se SnBi spoj jeví jako dobře vytvořený.

5.5 Analýza mikrovýbrusu pomocí elektronového mikroskopu

5.5.1 Elektronová mikroskopie

Pro snazší orientaci bude dobré v úvodu nastínit fungování elektronového mikroskopu. Jak mikroskop společnosti TESCAN, tak i model od společnosti Thermo Fisher Scientific jsou tzv. SEM mikroskopy, tedy skenovací nebo také rastrovací. Ty se vyznačují tím, že na rozdíl od svých transmisních protějšků neprosvěćují vzorek, ale elektronový paprsek „skenuje“ povrch vzorku na velmi malé oblasti.

Jak transmisní, tak i skenovací mikroskopie má své využití, ale z vlastností vzorků připravených mikrovýbrusem je zřejmé, že využijeme SEM metodu. Nejen že by se nám cca 1 cm tlustý vzorek neprosvítal, ale z předchozí kapitoly víme, že většina hmoty je tvořena dentakrylem, což je organická pryskyřice, která je tedy nevodivá a tím pádem pro elektronovou mikroskopii nevhodná.

Výhodou SEM je například velikost napětí, zatímco TEM metoda využívá zdroje od 200 kV do 300 kV, SEM zdroje zpravidla nepřesahují urychlovací napětí 100 kV, častěji spíše mnohem méně. Například pro tyto fotografie bylo použito urychlovací napětí „pouze“ 30 kV, v našem případě maximálně do 5 kV. To klade samozřejmě mnohem menší nároky na stabilitu zdroje vysokého napětí a tím i jeho velikost či cenu.

Ve stručnosti uvedeme několik základních charakteristik SEM metody. Zdroj elektronů (v případě Tescan Vega 3 Tungsten Electron Gun) pod vlivem napětí 30 kV emituje elektrony do vakua. Jedná se o termoemisní zdroj. V případě mikroskopu od společnosti Thermo Fisher Scientific (FEI) jsme použili model Scios 2, který se teprve chystá k prvním zákazníkům.

Jako zdroj elektronů je použit FEG (Field Emission Gun), který využívá pro tvorbu elektronů potenciál elektrického pole a emitör pokrytý oxidem zirkonia, který má za následek výrazné snížení výstupní práce elektronů. S tím je spojeno i snížení teploty, na kterou musí být katoda žhavená, a zvýšení životnosti systému.

V tubusu se nachází několik sad cívek, které mají za úkol vycentrovat, usměrnit a zaostřit svazek do co nejmenšího bodu. Namísto cívkami generovaného elektromagnetického pole lze použít i systém radiálně umístěných elektrod, mezi nimiž vzniká pole elektrické.

Po dopadu elektronového svazku na vzorek nastávají nejčastěji tyto akce:

- 1) Elektron se odrazí od povrchu nebo některé z vnitřních vrstev, ze kterých je ještě schopen se vrátit k povrchu a vzorek opustit. Odraz těchto elektronů je ovlivněn zejména atomovým číslem, kdy větší atomové číslo značí vyšší odrazivost primárního svazku elektronů. Z toho plyne, že v tomto režimu SEM dokáže odlišit místa na vzorku, která jsou tvořena různými prvky, nejlépe pak prvky s výrazně odlišnou hmotností atomů. Tuto funkci nazýváme materiálovým kontrastem.
- 2) Primární elektrony způsobí sekundární emisi elektronů z atomů, se kterými přišly do kolize během dopadu. Tyto sekundární elektrony mají nízkou energii a kratší dolet a k detektoru se dostanou ve větší míře elektrony z nakloněných ploch než z kolmých k primárnímu svazku. Proto nesou informaci o topografii vzorku. Díky tomuto režimu jsme schopni zjistit, nakolik je povrch zvrásněný či například popraskaný.
- 3) S emisí elektronů z vyšších energetických vrstev souvisí i uvolnění značného množství energie. Ta bývá uvolněna formou elektromagnetického záření, u vyšších energetických hladin pak rentgenovým zářením. Pro analýzu nás zajímá charakteristické rentgenové záření, jehož energie přímo udává, ze které vrstvy elektronového obalu bylo záření emitováno. Tato energie je pro každý prvek charakteristická, tudíž se této metody využívá pro prvkovou analýzu vzorků. Hlavní rozdíl mezi zachytem odražených elektronů a rentgenového záření je v tom, že zatímco odražené elektrony nesou grafickou informaci o hustotě vzorku, energie rentgenového záření je normovaná a lze po porovnání s databází přesně zjistit, o jaký prvek se jedná.

Elektronový mikroskop pracuje i s dalšími signály, ty ovšem nebyly při této práci využity, proto se teoretický popis omezuje právě na tyto tři.

Pro sledování intermetalických vrstev byl použit detektor zpětně odražených elektronů. Tyto elektrony nesou, jak již bylo zmíněno výše, informaci o materiálovém složení. Zvětšení se na snímcích liší, vždy je uvedeno pod konkrétní fotografií, nejvyšší zvětšení je 40 000x.

5.5.2 Příprava vzorků

Výchozím produktem pro přípravu vzorku do elektronového mikroskopu byly mikrovýbrusy, jejichž příprava je uvedena v předchozí kapitole. V souvislosti s elektronovou mikroskopií je třeba zmínit, že dentakryl je nutné připravovat velmi jemně. Při prudkém míchání se zvyšuje zastoupení vzduchu ve směsi, který ve výsledku vytvoří menší či větší bubliny v objemu výbrusu. Ty se pak pod silou podtlaku v komoře mají tendenci uvolňovat do prostoru a komoru zavzdušňovat.

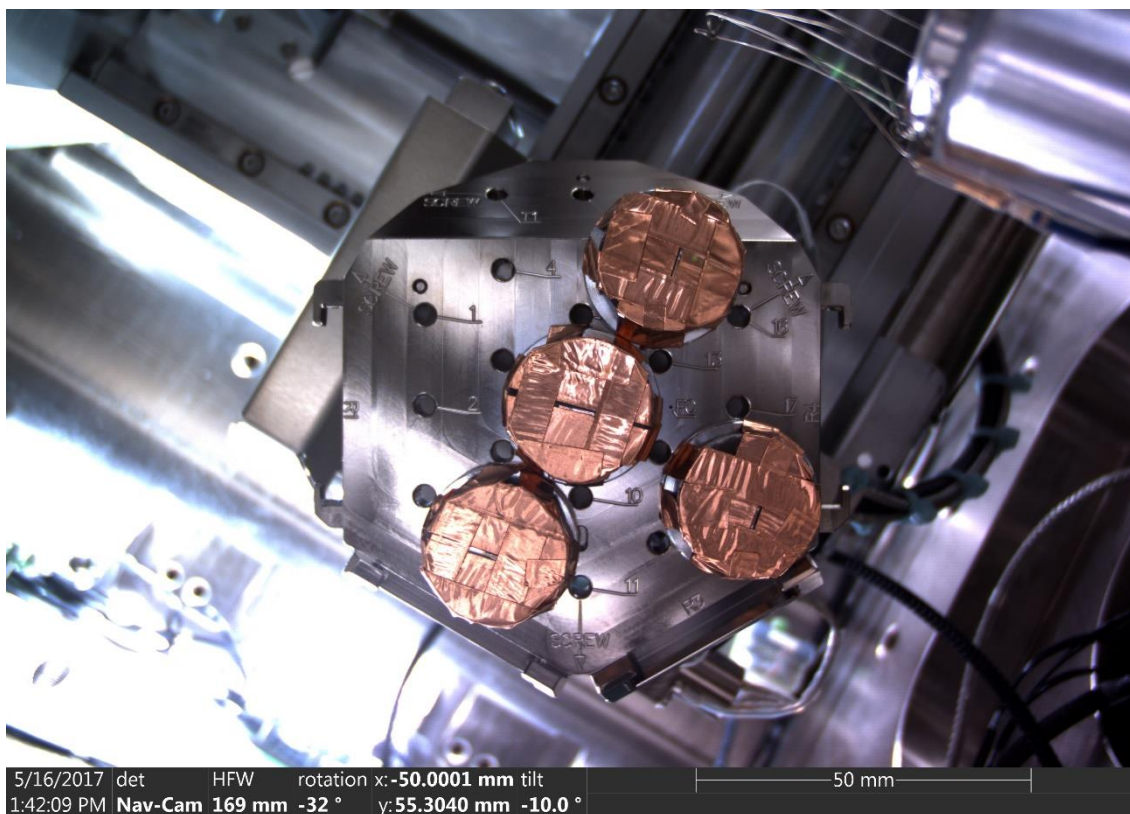
Vzhledem k tomu, že v komoře mikroskopu Scios 2 je pro spuštění elektronového svazku v režimu HiVac (vysokého vakua) vyžadováno vakuum řádově 10^{-3} Pa, je každá kontaminace vzorku problematická.

Tyto mikrovýbrusy se musely upravit pro upevnění na zemnicí držák. K tomu bylo třeba zejména precizně zabrousit vzorky ze spodní strany do tenkého "puku".

Protože velká plocha celého vzorku je tvořena dentakrylem, který je nevodivý a zároveň je zdrojem nečistot a plynů, musel přípravek projít celou řadou procedur, zejména očištěním isopropylalkoholem a zastíněním měděnou lepící fólií, která se kontaktovala se zemnicí podložkou.

Ideální stav je takový, kde je mimo měď vidět pouze měděná ploška na desce, pájka a měděná plocha diody. To je důležité zejména kvůli nabíjení již zmíněného dentakrylu, což má za následek zářivé artefakty a podstatné zhoršení kontrastu celé fotografie. Jakmile by se vzorek jednou nabil, nebylo by ho možné znovu pozorovat, dokud by nedošlo k vybití, k čemuž by bylo potřeba zavzdušnit komoru a opět ji vyčerpat.

Na následující fotografii můžeme vidět umístění vzorků v komoře, fotografie je pořízená z navigační kamery uvnitř mikroskopu.



Obr. 43 Umístění mikrovýbrusů v komoře elektronového mikroskopu Scios 2

Ačkoliv se může z následujících snímků zdát, že mikrovýbrus je velmi hrubý, je nutno vzít v potaz zvětšení až 40 000x. Navíc zaostřování mikroskopu je nutno provádět právě na nerovnostech, kde je vyšší kontrast, proto i na vzorku, který je téměř dokonale vyleštěný, se fotografie nakonec pořídila na místě, kde byla nečistota či rýha.

5.5.3 Použitá zařízení

Pro nasnímaní prvního vzorku byl použit mikroskop TESCAN VEGA 3, to je patrné také z fotografie, kde je model uveden. Jak již bylo zmíněno, jedná se o mikroskop s termoemisním zdrojem, který je pro výzkumné účely dovybaven mnoha nadstavbovými moduly, z nichž pro tuto práci byl stěžejní detektor zpětně odražených elektronů a detektor charakteristického záření, který dokáže zprostředkovat prvkovou analýzu.

Pomocí této metody bylo ověřeno, že pájecí slitina ve vzorcích první generace není kontaminovaná vnějšími nečistotami. To bylo vyloučeno, proto není prvkové analýze věnován větší prostor.

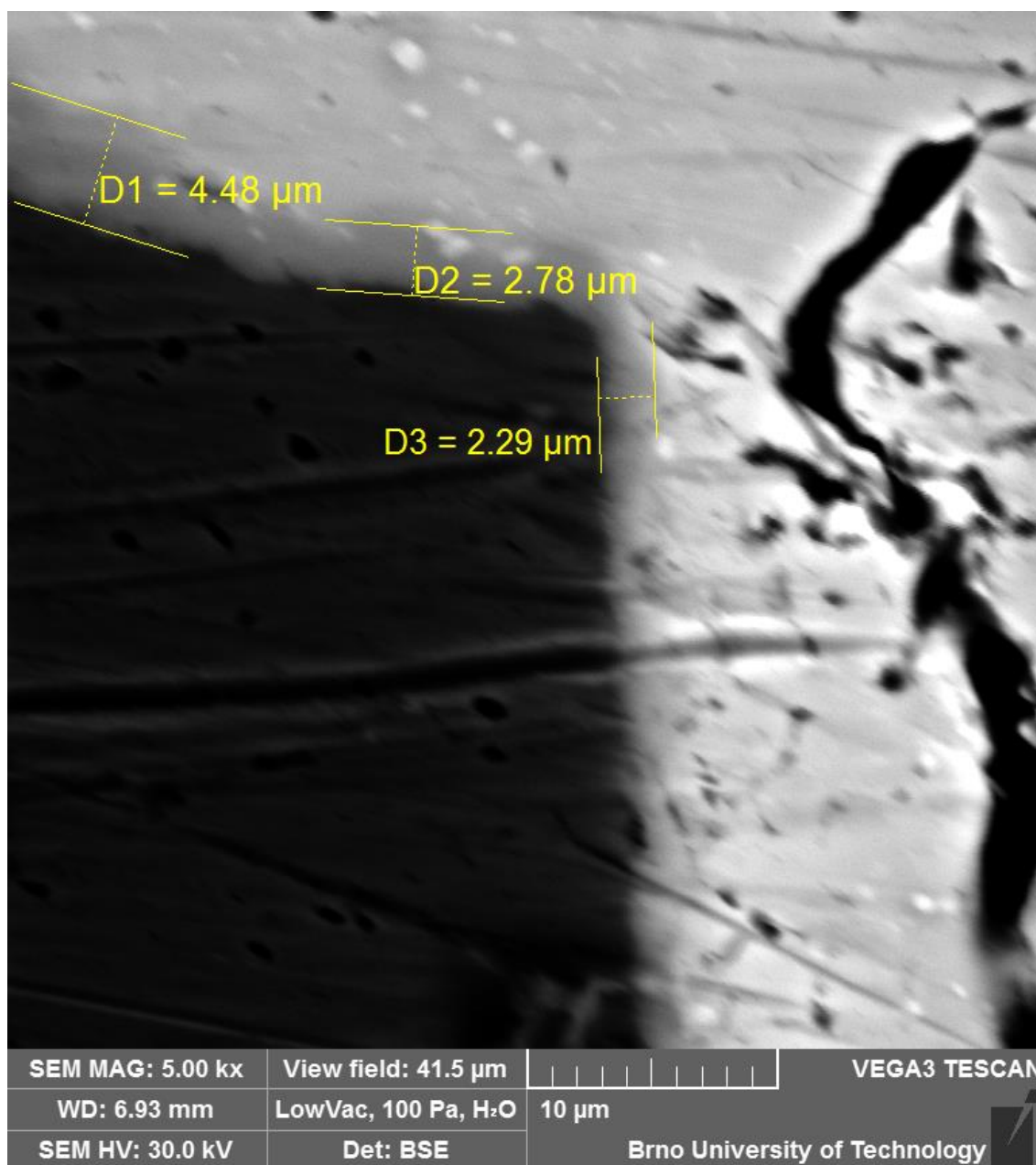
Nutno podotknout, že horší kvalita obrazu byla způsobena aktuálním rozladěním mikroskopu a ani s pomocí vedoucího laboratoře nebylo možné získat lepší snímek. Přesto jsou získané informace z tohoto měření cenné a jedná se o velice efektivní systém.

O to vyšší péče byla věnována pořízení druhé sady snímků, které dokumentují stěžejní část práce, tedy porovnání SnBi a SAC pájky.

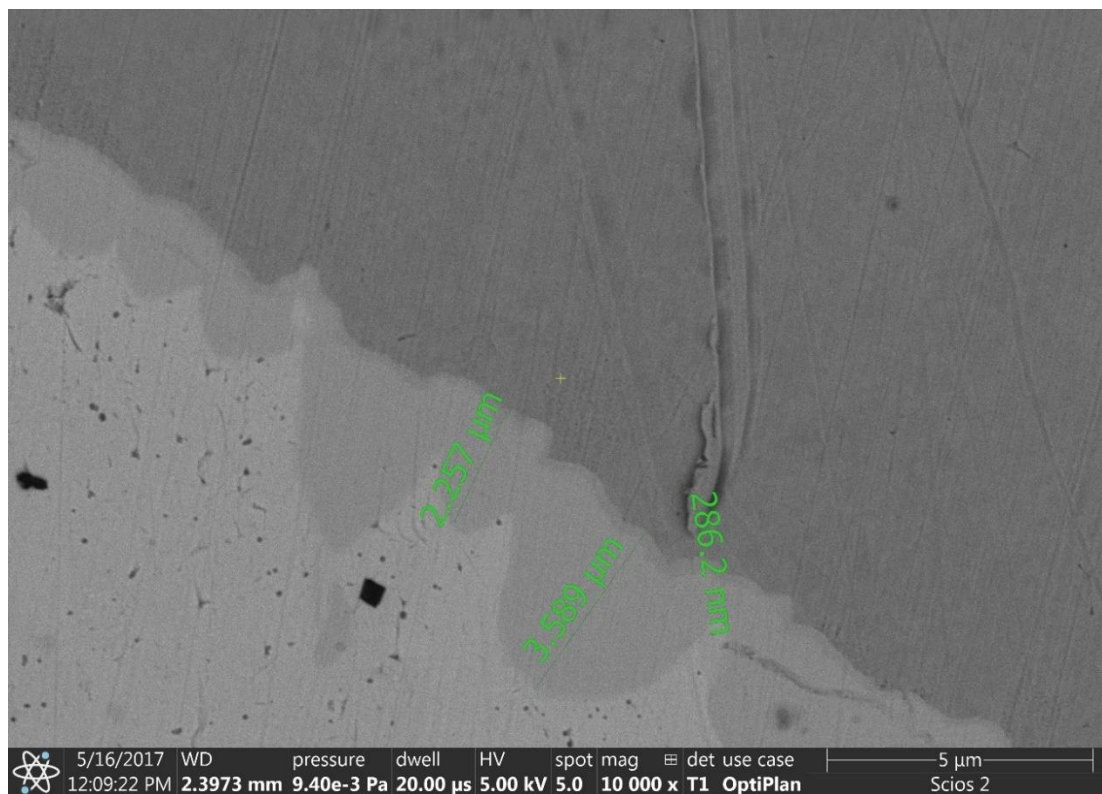
Mikroskop Scios 2 je nová generace SDB řady (Small Dual Beam), která kromě elektronů dokáže využívat paprsku iontů, kterými může například obrábět vzorek přímo v komoře mikroskopu. Vzhledem k tomu, že tato schopnost mikroskopu nebyla pro práci využita, nebudu se jejím popisem více zabývat.

Uživatelské rozhraní je velice podobné, snímek se získává postupnou kombinací ostření, korekce astigmatické vady cívek a úpravy intenzity paprsku a kontrastu. Přesto je nejdůležitější praxe a čas strávený se zařízením.

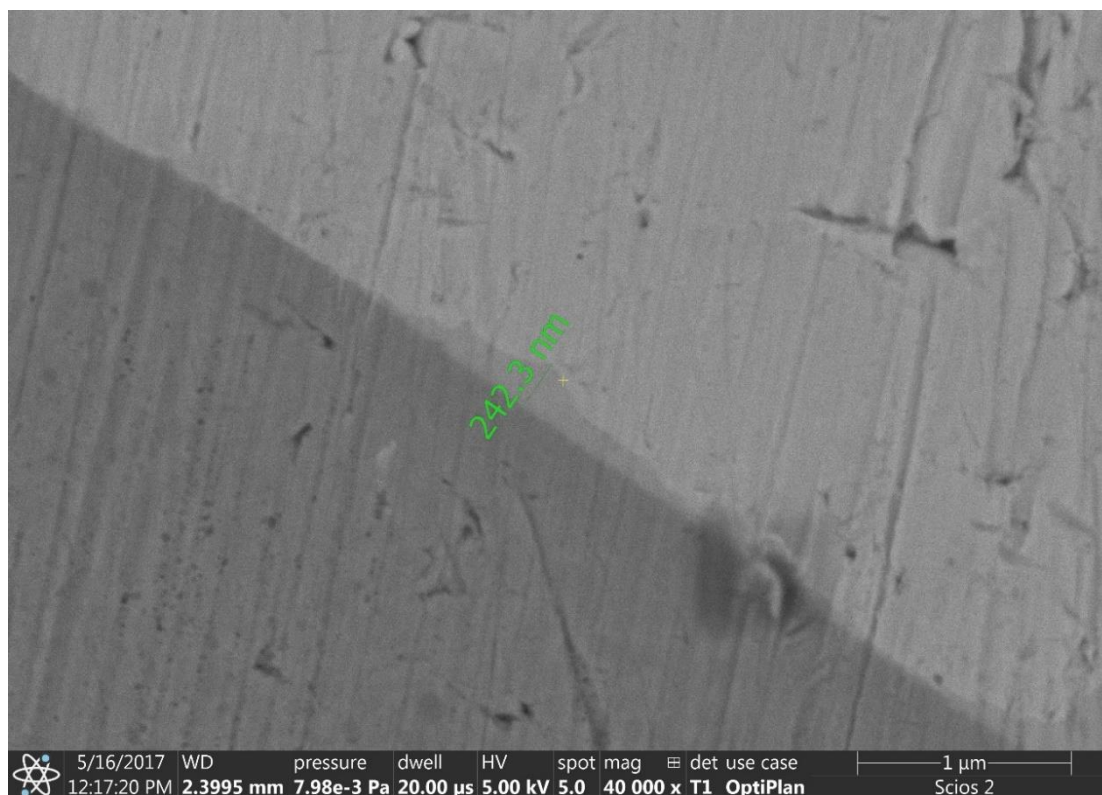
5.5.4 Snímky z elektronového mikroskopu



Obr. 44 Snímek z elektronového mikroskopu – tloušťka intermetalické vrstvy SAC pájky 1. generace – snímek získán za pomoci Ing. Pavla Čudka



Obr. 45 Snímek z el. mikroskopu 10 000x zvětšeno – SAC pájka 2. generace – kontakt s deskou



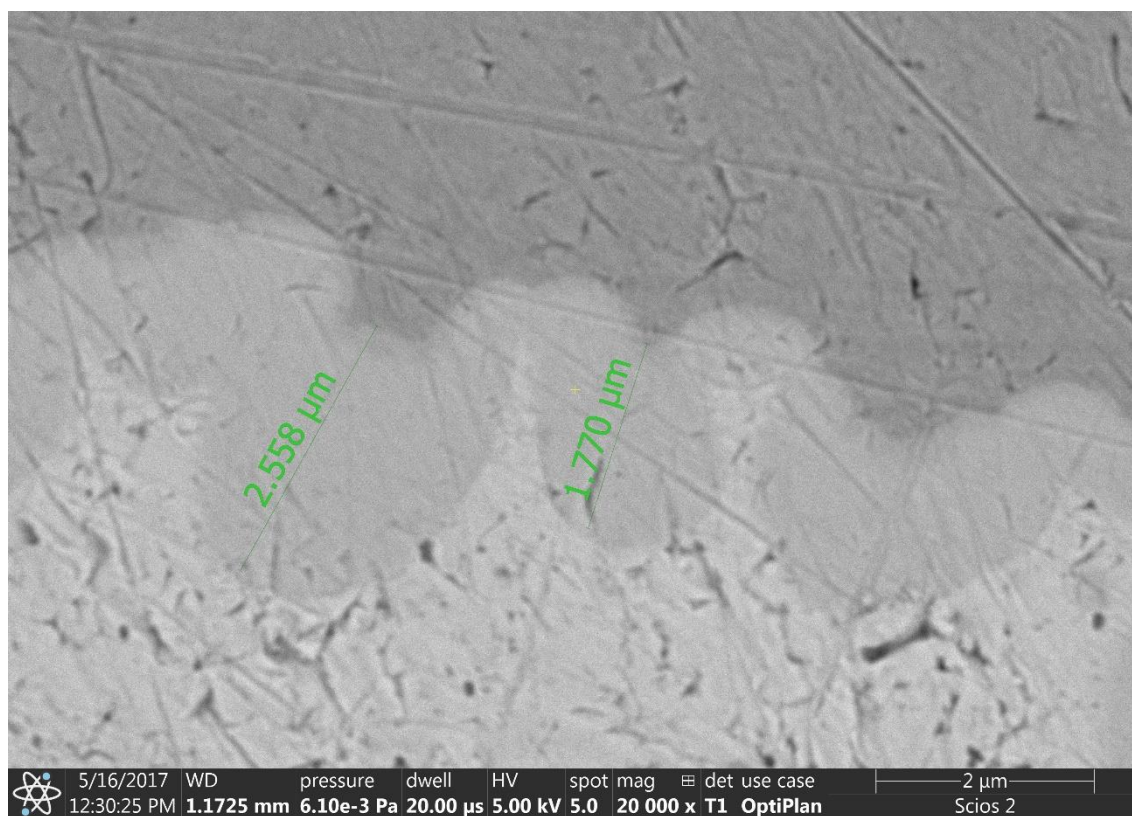
Obr. 46 Snímek z el. mikroskopu 10 000x zvětšeno – SAC pájka 2. generace – kontakt s LED

Můžeme vidět, že velikost intermetalické vrstvy je téměř totožná s první fotografií pořízenou školním mikroskopem Tescan. Na první pohled je patrné, že IMC vrstva více narůstá na straně desky, na LED kontaktu pak úplně chybí, místy se objevuje vrstva o rozměru 100–300 nm, tedy asi 10x menší.

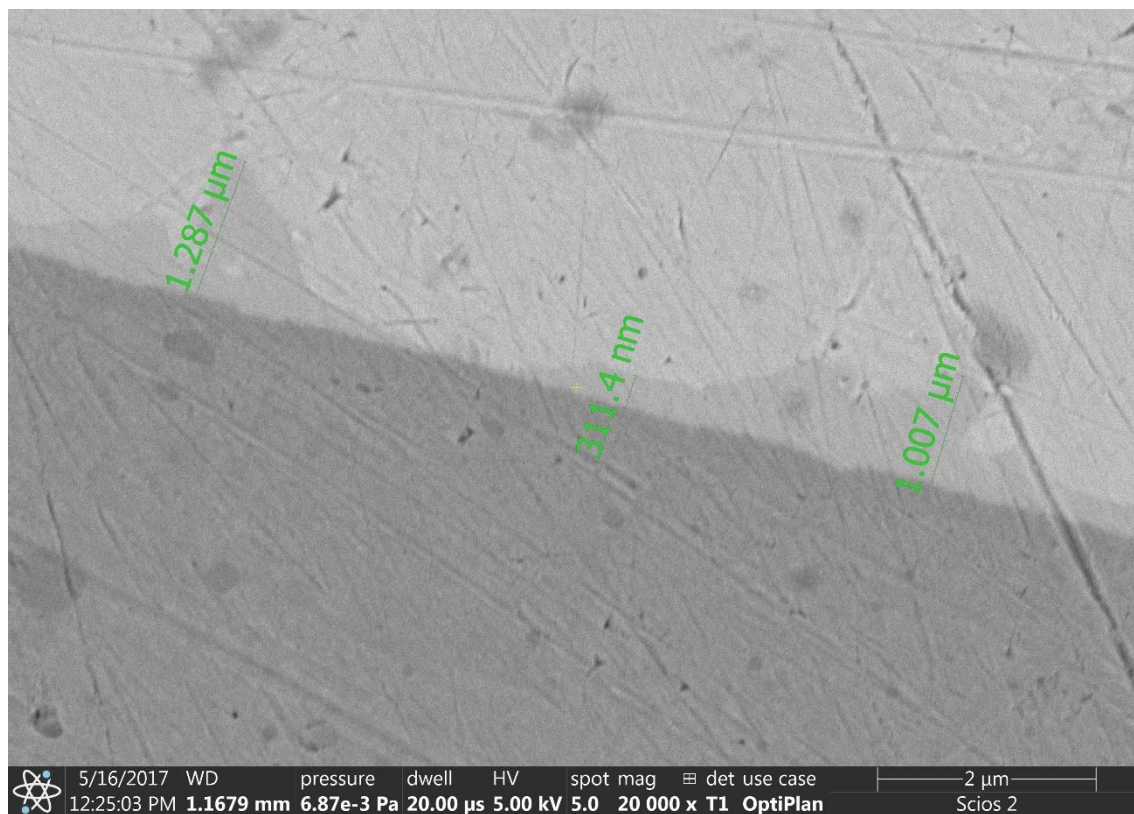
Na straně desky taktéž můžeme pozorovat, že vrstva IMC není kontinuální, ale nabývá výrazně proměnných rozměrů.

Z této série snímků lze konstatovat, že přepracování SAC profilu nemělo vliv na velikost IMC vrstvy. Z předchozích kapitol také víme, že četnost a velikost voidů zůstaly téměř totožné.

Pro ověření výše uvedených informací byl připraven ještě jeden mikrovýbrus SAC pájky, výsledky jsou opět totožné, což nás vede k potvrzení správnosti tohoto měření.

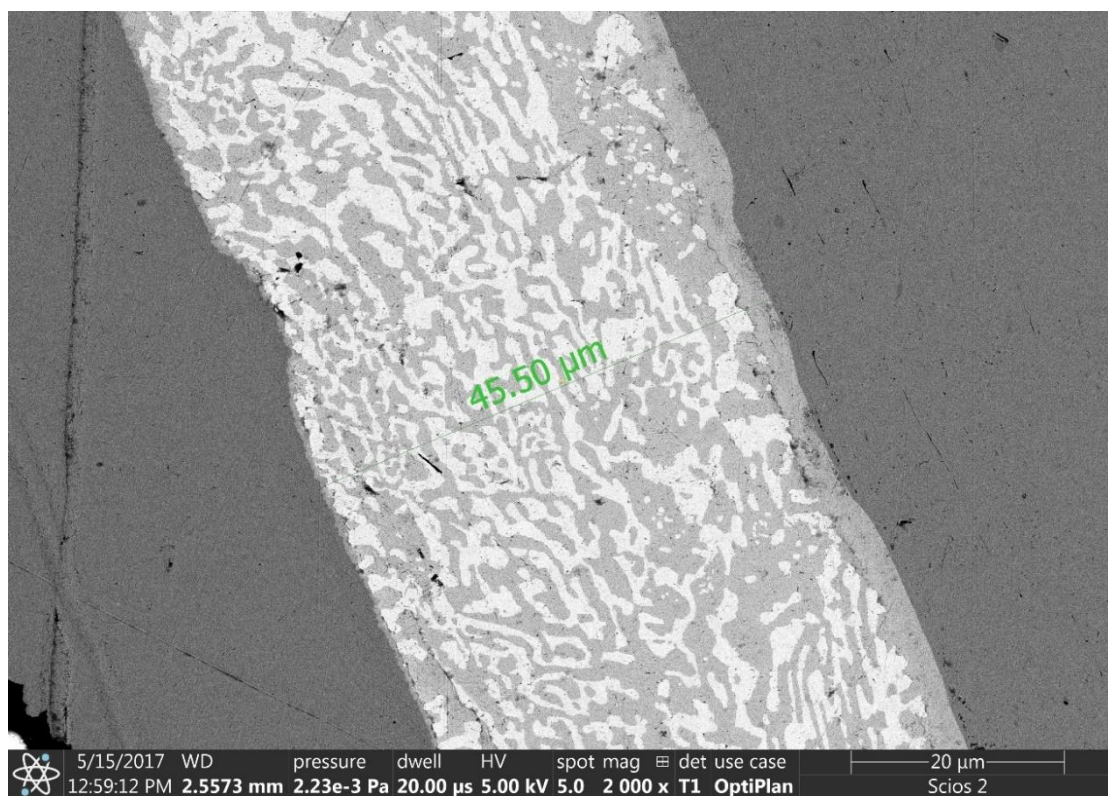


Obr. 47 Snímek z el. mikroskopu 10 000x zvětšeno – SAC pájka 2. generace – kontakt s deskou – vzorek 2

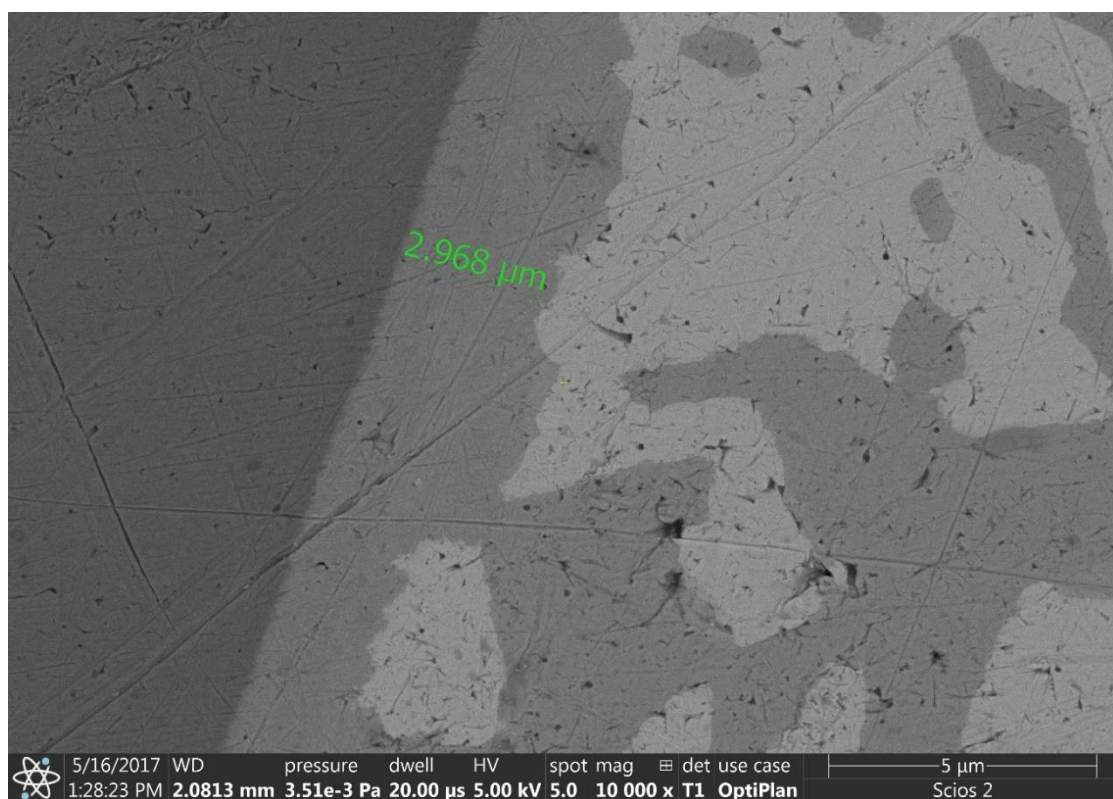


Obr. 48 Snímek z el. mikroskopu 10 000x zvětšeno – SAC pájka 2. generace – kontakt s LED – vzorek 2

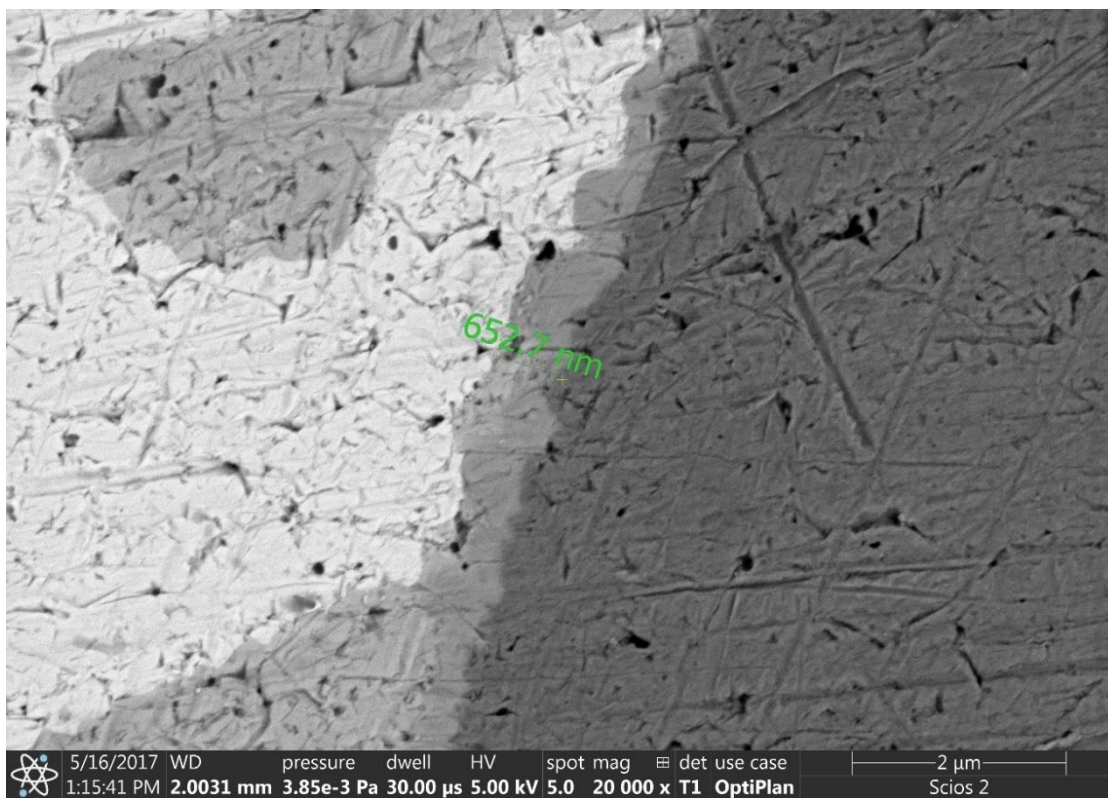
Na následujících snímcích je pro porovnání vyfoceno rozhraní SnBi pájky s mědí desky a LED. Na nich je patrná vlastnost SnBi pájky, která již byla uvedena v teoretickém úvodu a totiž, že na rozdíl od SAC netvoří SnBi slitinu v pravém slova smyslu. Naprosto zřetelně zde vidíme materiálový kontrast mezi ostrůvky cínu a bismutu, které se neslučují. V kontaktu s mědí je pak výhradně cín. Bismut je světlejší díky vyššímu atomovému číslu (83 Bi oproti 50 Sn a 29 Cu), což má za následek vyšší produkci zpětně odražených elektronů (viz kapitola s úvodem do elektronové mikroskopie).



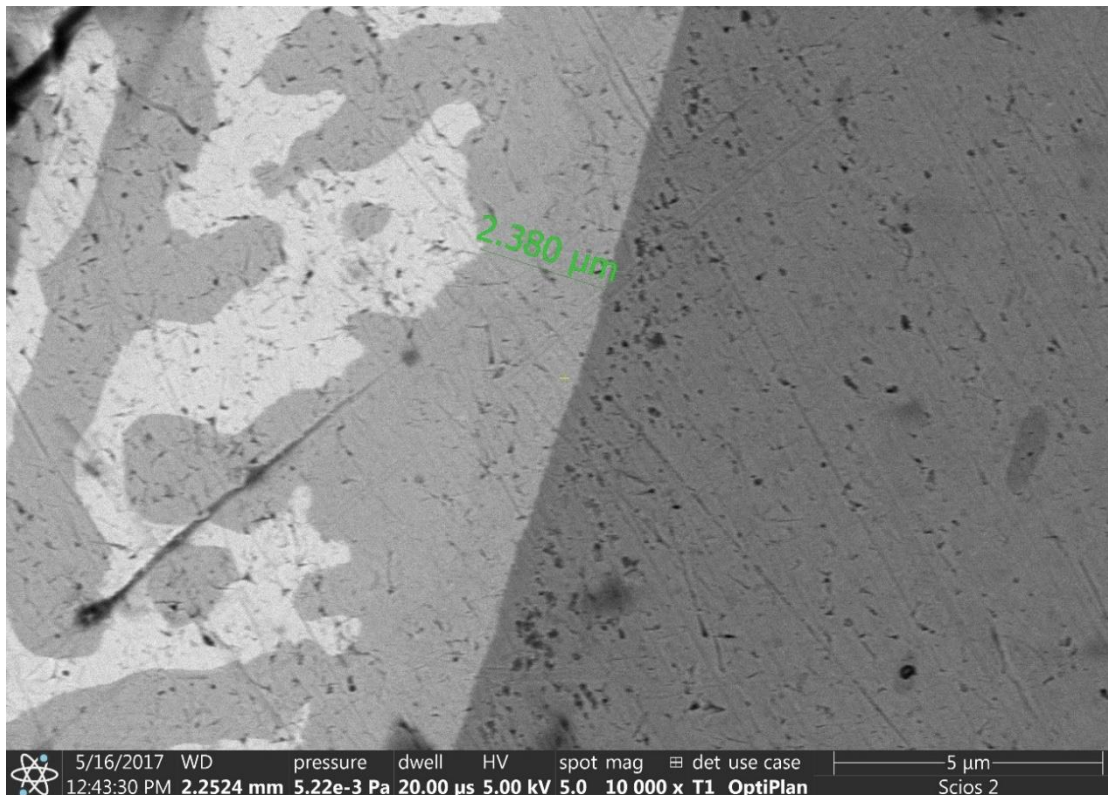
Obr. 49 Pohled na celý spoj SnBi o šířce 45,5 μm



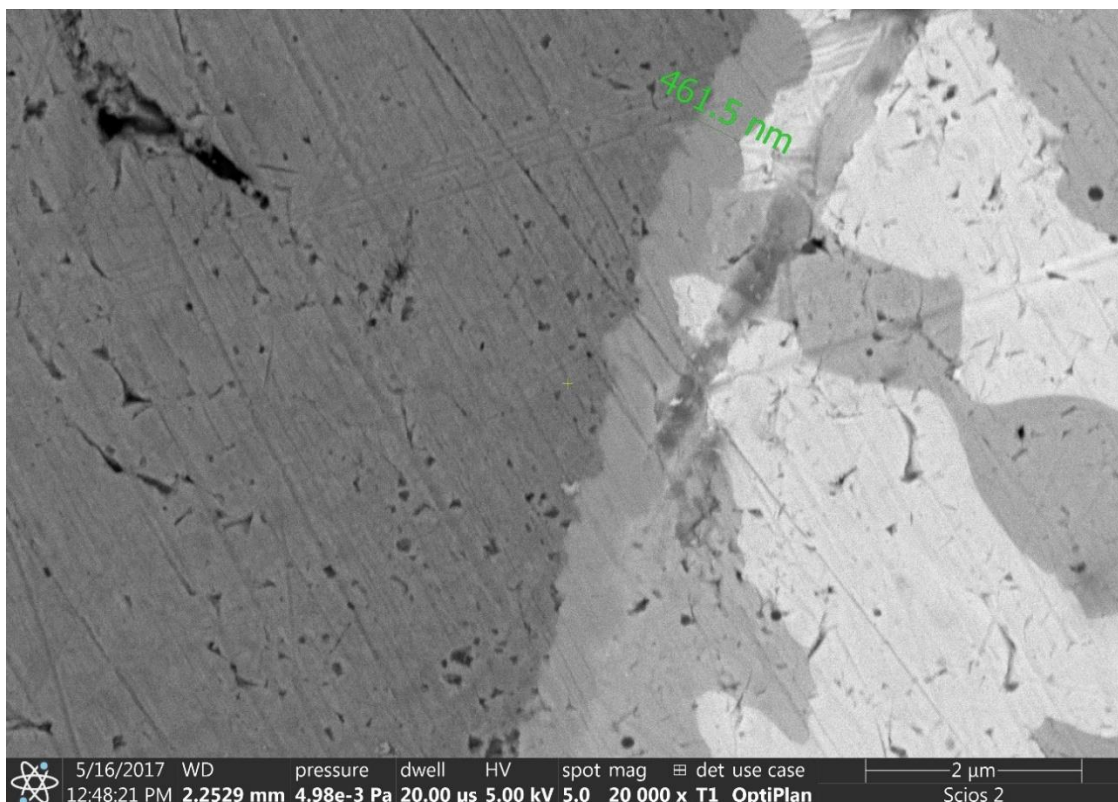
Obr. 50 IMC vrstva SnBi pájky – rozhraní s LED – vzorek 1



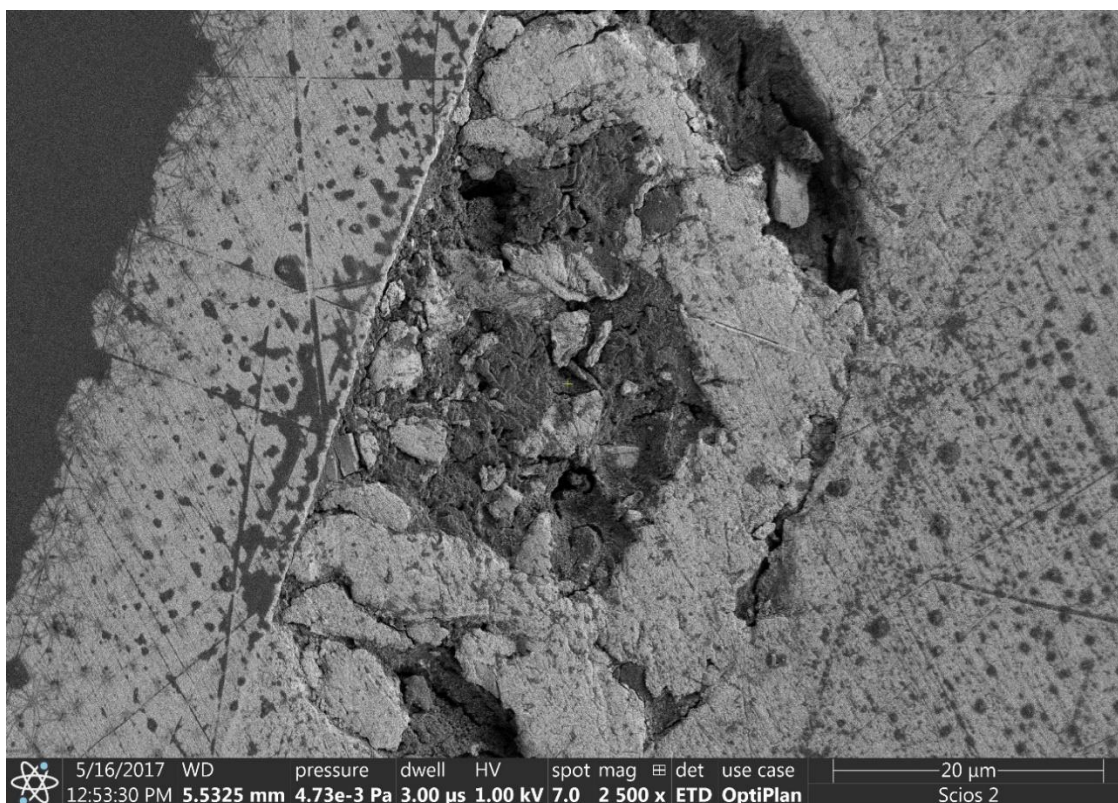
Obr. 51 IMC vrstva SnBi pájky na rozhraní s deskou – vzorek 1



Obr. 52 IMC vrstva SnBi pájky – rozhraní s LED – vzorek 2



Obr. 53 IMC vrstva SnBi pájky na rozhraní s deskou – vzorek 2



Obr. 54 Topografie voidů SnBi pájky, pořízeno detektorem sekundárních elektronů

Na předchozím obrázku můžeme pro zajímavost vidět topografii voidu v SnBi pájce pořízené pomocí detektorů sekundárních elektronů. Co se týče snímků získaných odraženými elektrony, vidíme velice kontrastní strukturu, kterou jsme již vysvětlovali výše.

Na detailech jsou vidět pásy, které jsou v kontaktu s mědí. Zde bismut zcela chybí. Jak již víme z teoretické části, bismut se neúčastní tvorby intermetalických vrstev. Navíc je v něm cín prakticky nerozpustný.

5.5.5 Diskuze výsledků

V rámci této kapitoly bylo vytvořeno celkem 7 mikrovýbrusů, které zastupovaly jednotlivé vzorky, jež jsme zkoumali. S pomocí elektronového mikroskopu se podařilo určit tloušťku intermetalické vrstvy, která je na ploše spoje asi 2,3 μm . Ačkoliv původní předpoklad počítal s tím, že intermetalická vrstva je na obou stranách spoje stejně široká, praxe ukázala, že se vždy vytvoří širší vrstva na jedné straně spoje a na druhé tenčí.

Zvláštností je, že zatímco u SAC pájky se širší vrstva vytvořila na straně sousedící s mědí plátovanou na desku, SnBi má širší intermetalickou vrstvu na straně sousedící s mědí kontaktu diody. Tento jev není náhodný a potvrdil se u všech zkoumaných vzorků.

Plátovaná měď na desce je přitom mnohonásobně tenčí než vrstva na LED.

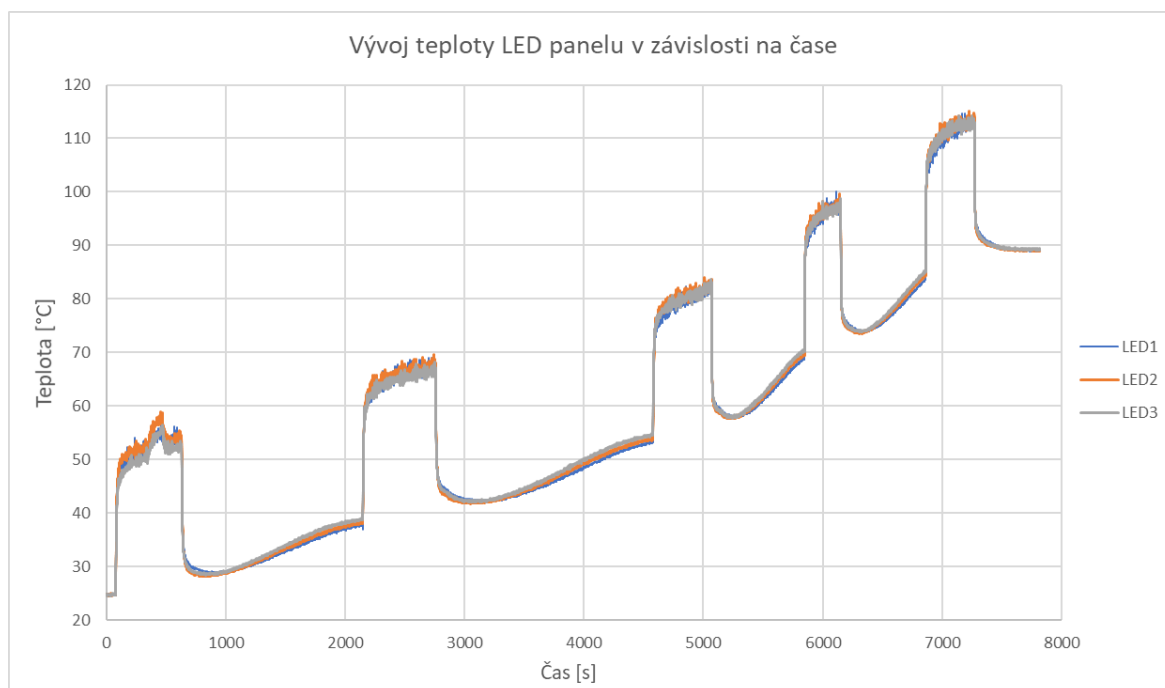
Celkově se ovšem podařilo potvrdit šířku IMC vrstvy, která je v obou případech velmi proměnlivá.

5.6 Oteplení panelu během izotermálního zrychleného stárnutí

V této kapitole se zaměříme na sledování vývoje teploty LED panelu, pájeného pomocí SnBi pasty, během ohřevu v klimatické komoře. Původní záměr zrychleného stárnutí byl po domluvě s vedoucím práce pozměněn z důvodů bezpečnostních a časových. LED panel byl osazen termočládky, které byly připojeny na profiloměr SLIM KIC 2000. Panel byl analyzován po skocích po 15 °C při 25 °C, 40 °C, 55 °C, 70 °C a 85 °C.

Experiment probíhal cyklicky, kdy se panel vždy nechal temperovat na určenou teplotu a po jejím ustálení se LED diody spustily. Sledovanými jevy byla teplota na LED a funkčnost celého panelu.

Výsledky všech měření byly převedeny do uceleného grafu, kde můžeme vidět celý průběh v čase od 25 °C až po 85 °C.



Obr. 55 Průběh teploty na LED panelu během experimentu

V grafu si povšimněme zejména prudkého nárůstu teploty na LED ihned po zapnutí osvětlení. Teplota stoupla průměrně o 25 °C bez ohledu na vliv teploty okolí. Při maximální teplotě 85 °C, kterou lze srovnat kupříkladu s uzavřeným prostorem vystaveném slunečnímu záření, pak teplota panelu dosahovala až 114 °C.

Vývoj teploty během provozu je třeba vzít v úvahu zejména pokud existuje důvod se domnívat, že bude osvětlení provozováno ve zvýšených teplotách.

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo přinést srovnání kvality LED panelů pájených pomocí SAC pasty při různých teplotních profilech a SnBi pasty. Pomocí nedestruktivních i destruktivních metod vyhodnotit kvalitu a posoudit, který proces je z hlediska kvality vhodnější.

V praktické části práce jsme se zabývali metodikou měření teplotních profilů, se kterými byly vytvořeny SAC LED panely, a porovnáním těchto profilů za různých podmínek v peci.

Zásadním zjištěním byl fakt, že pec v okamžiku sepnutí ohřevu nedokáže včas zpracovat zpětnou vazbu a teplotní profil je tak deformován mimo procesní okno. Nejen na tento fakt následně společnost zareagovala investicí do nového vybavení.

Největší výzvou pak bylo navržení teplotního profilu pro využití SnBi pájecí pasty. Jelikož společnost Osmont nikdy tento proces netestovala, bylo potřeba proces vytvořit zcela od začátku. V práci je popsána metodika návrhu profilu, podle čehož by měl být kdokoliv schopen tento proces replikovat. V tomto dle mého názoru tkví značná část hodnoty práce.

V diagnostické části byla provedena analýza tří generací LED panelů. Každý vzorek byl zkoumán pod rentgenovým tomografem. Následně byl podroben odtrhové zkoušce pevnosti, po které následovalo provedení mikrovýbrusu a jeho zkoumání pod optickým a elektronovým mikroskopem.

Na mikrovýbrusu vidíme opět tři generace LED panelů. První generace vykazala během broušení slabou mechanickou pevnost, což byl vůbec první impuls pro provedení celé analýzy. V oblasti mezi voidy se začala šířit trhlinka a její vzhled je vidět na fotografii v příslušné kapitole

Druhá generace SAC pasty se již jeví pevně a žádná prasklina se zde neobjevila, na rozhraní pájky a mědi na desce se však objevuje souvislá řada mikrovoidů, které jsou rizikové zejména v kontextu stárnutí spoje. Z tohoto důvodu by bylo vhodné provést u všech tří generací zkoušky přirozeného stárnutí spoje v provozu. Tento test je sice časově náročný, ale nejvíce vypovídá o reálných změnách ve struktuře spoje.

SnBi spoj pod optickým mikroskopem vypadá zcela shodně s předpoklady. Intermatalická vrstva je užší, ale je vytvořená správně a její tloušťka je na rozdíl od SAC pasty homogenní. Z tohoto pohledu se SnBi pasta jeví jako velmi zajímavá.

Na rentgenových snímcích vidíme, že SAC pasta vytváří voidy značných rozměrů bez ohledu na profil, kterým byla zapájena. Voidy pod těmito LED dosahují rozměrů až 40 % celého spoje, což je nebezpečné zejména ve chvíli, kdy se void ocitne v blízkosti okraje spoje. SnBi pasta v tomto ohledu vyhovuje normám více, neboť velikost voidů je zanedbatelná. Větší množství těchto voidů není vzhledem k velikosti celého spoje zásadní

a po stránce optické (rentgenové) analýzy SnBi pasta zcela vyhovuje.

Odtrhové zkoušky prokázaly dostatečnou pevnost jak SAC pasty, tak i SnBi. Oba vzorky vykazovaly značnou mechanickou odolnost, která ovšem byla vzhledem k velikosti spoje očekávána. Nejslabším článkem je tedy samotná pevnost LED, která v tomto testu praskla vždy dříve než spoj samotný.

Co se týče rozdílu mezi druhou generací SAC a SnBi, ani v jednom z případů nebylo zjištěno další šíření prasklin a spoj se jeví jako pevný. Hlavní důvod k vytvoření těchto mikrovýbrusů však nebyl pohled pod optickým mikroskopem, nýbrž získání prostředku pro inspekci mikroskopem elektronovým.

K této práci byly použity dva elektronové mikroskopy v různých režimech, které lze snadno srovnat po prohlédnutí hlavičky na každé fotografii. Školní mikroskop Tescan Vega 3 byl použit k určení šířky intermetalické vrstvy a k provedení spektrální rentgenové analýzy. Ta potvrdila, že spoj neobsahuje žádnou kontaminaci jinými látkami mimo kovy, které mají být ve spoji přítomny.

Samotná podoba spoje pak byla studována na elektronovém mikroskopu FEI Scios 2. Snímky zobrazují rozložení intermetalických sloučenin, což je ve shodě s informacemi, které jsme získali z metalografického mikroskopu. V obou případech se tvorby těchto sloučenin účastní zejména cín a měď, jak je vidět z fotografií. Zejména bismut se pak tvorbě sloučenin s cínem i mědí zcela vyhýbá a tvoří samostatné ostrůvky ve spoji. To je zcela v souladu s očekáváním, které jsme získali studiem z odborných pramenů. S tím souvisí i fakt, že intermetalická vrstva SnBi pasty je tenčí. Spoj je tak vytvořen, ale nežádoucí vlastnosti intermetalických sloučenin, mezi které patří zejména křehkost a velmi nízká mechanická odolnost, jsou zde minimalizovány. V samostatné kapitole bylo uvedeno velice významné zjištění, že desky pájené při teplotním profilu SnBi pasty neprojevují na rozdíl od SAC prohnutí po zapájení. U původních vzorků bylo toto prohnutí až 1 cm, což způsobovalo vnitřní pnutí a nemalé riziko pro mechanickou pevnost spoje.

Shrnutím výše zmíněných faktů jsem dospěl k názoru, že SnBi pasta je pro LED panely použitelná a nese několik výhod. Lze pájet produkty při nižší teplotě o 33 % (87 °C) a je možno eliminovat vnitřní pnutí desky díky absenci prohnutí. Dále je pak možné očekávat vyšší životnost LED komponenty díky vystavení menším teplotám. V neposlední řadě se v SnBi spoji nevyskytovaly mikrovoidy, jako tomu bylo u SAC. Všechny tyto faktory ovlivňují mechanickou pevnost a usnadňují výrobu i další práci s LED panely.

BIBLIOGRAFIE

- [1] STARÝ, J., M. ZATLOUKAL. *Montážní a propojovací technologie*. Brno, 2015. Skripta. Vysoké učení technické v Brně.
- [2] *Flux-Free Formic Reflow* [online]. New Jersey: Heller Industries, 2016 [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <http://www.hellerindustries.com/formic-reflow.php>
- [3] MATRAS, J. *Vliv povrchových úprav DPS na pájitelnost při pájení v parách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.
- [4] ČEPEK, Martin. *Mechanické vlastnosti spojů pájených ultrazvukem*. Praha, 2016. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [5] JEŽEK, Vladimír. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje*. Brno, 2015. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý.
- [6] Xtronics.com. Xtronics.com [online]. 2006 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <https://wiki.xtronics.com/images/7/75/SAC.gif>
- [7] ŠIMON, V. *Mechanismy vzniku dutin u bezolovnatých pájených spojů a vliv na spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [8] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno: VUTUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [9] PAŠKO, M. *Spolehlivost bezolovnatého pájeného spoje*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Petr Stejskal.
- [10] *Složení pájecích past* [online]. Brno: AF CZECH, 2016 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.koki.org/slozenipajecichpast.html>
- [11] TAO, Bo, Yiping WU, Han DING a Y.L. XIONG. A quantitative method of reliability estimation for surface mount solder joints based on heating factor Q η. *Microelectronics Reliability* [online]. Elsevier, 2006, **46**(5), 864-872 [cit. 2016-12-15]. DOI: 10.1016/j.microrel.2005.04.013. ISSN 00262714.
- [12] TAO BO, YIN ZHOUPING, DING HAN a WU YIPING. Reflow profile optimization of BITμ/IT/BBGA solder joints considering reflow temperature and time coupling. *Soldering & Surface Mount Technology* [online]. Emerald Group Publishing Limited, 2009, **21**(4), 38-44 [cit. 2016-12-15]. DOI: 10.1108/09540910910989420. ISSN 09540911.
- [13] KOSIBA, Eva. *Characterization of Low Melting Temperature, Low-Ag, BiContaining, Pb-Free Solder Alloys*. Toronto, 2016. Thesis. University of Toronto. Vedoucí práce Doug Perovic.

- [14] OLSON, Aaron. What are Intermetallics and How Can We Overcome the Failures Associated with Them. What are Intermetallics and How Can We Overcome the Failures Associated with Them? [online]. Madison AL: sti electronics, 2013 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.tch.es/wp-content/uploads/Intermetallics.pdf>
- [15] S. Prasad, F.Carson, G.S. Kim, J.S. Lee, P. Roubaud, G. Henshall, S. Kundar, A. Garcia, R. Herber, R. Bulwith., “Board Level Reliability of Lead-Free Packages”, Proceedings of SMTA, Chicago September 2000, pp 272-276
- [16] P.T. Vianco, K.L. Erickson, P.L. Hopkins, “Solid State Intermetallic Compound Growth Between Copper and High Temperature, Tin-Rich Solders”, Journal of Electronic Materials, Vol.23, No 8, 1994, p. 721
- [17] Chen L. D., Huang M. L. & Zhou S. M. Effect of electromigration on intermetallic compound formation in line-type Cu/Sn/Cu interconnect. J. Alloys Comp. 504, 535–541 (2010).
- [18] ZHAO, N., Y. ZHONG, M.L. HUANG, H.T. MA a W. DONG. Growth kinetics of Cu₆Sn₅ intermetallic compound at liquid-solid interfaces in Cu/Sn/Cu interconnects under temperature gradient. Scientific Reports [online]. 2015, 5(1), - [cit. 2017-05-28]. DOI: 10.1038/srep13491. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/srep13491>
- [19] YOON, Jeong-Won, Young-Ho LEE, Dae-Gon KIM, et al. Intermetallic compound layer growth at the interface between Sn–Cu–Ni solder and Cu substrate. Journal of Alloys and Compounds [online]. Elsevier B.V, 2004, 381(1), 151-157 [cit. 2017-05-28]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2004.03.076. ISSN 0925-8388.
- [20] KANG, T.Y., Y.Y. XIU, C.Z. LIU, L. HUI, J.J. WANG a W.P. TONG. Bismuth segregation enhances intermetallic compound growth in SnBi/Cu microelectronic interconnect. Journal of Alloys and Compounds [online]. Elsevier B.V, 2011, 509(5), 1785-1789 [cit. 2017-05-28]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.10.040. ISSN 0925-8388.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma konvekční pece Heller [2]	14
Obr. 2 Schématické znázornění topné jednotky konvekční reflow pece [1]	14
Obr. 3 Porovnání přirozené a nucené konvekce v radiační peci [1]	15
Obr. 4 Schéma složení pájecí pasty	18
Obr. 5 Fázový diagram SAC pájky [6]	20
Obr. 6 SnBi fázový diagram [13].....	22
Obr. 7 Definice integrálu teploty a času pro pájecí slitinu Sn63Pb37 [12]	24
Obr. 8 Závislost střední doby do poruchy na integrálu teploty a času při cyklickém teplotním namáhání [11]	25
Obr. 9 Závislost střední doby do poruchy na integrálu teploty a času při vibračním namáhání [12]	26
Obr. 10 Průřez pájeným spojem na rozhraní mědi a cínu [1]	27
Obr. 11 Doporučené nastavení profilu dle výrobce SAC pasty Encorel	30
Obr. 12 Schéma přetavovací pece Autotronik	30
Obr. 13 Profiloměr Slim KIC s tepluvzdorným obalem.....	31
Obr. 14 Použité termočlánky	32
Obr. 15 Hotový přípravek pro měření SAC teplotního profilu.....	33
Obr. 16 Teplotní profil bez automatického zpracování	34
Obr. 17 Informace výrobce k LED	35
Obr. 18 Zpracovaný report ze SW KIC 2000 pro průchod měřícího přípravku mezi deskami	35
Obr. 19 Teplotní profil SAC pájky Encorel při průchodu pouze měřící aparatury	37
Obr. 20 Ideální profil dle technického listu výrobce SnBi pasty	39
Obr. 21 Prvotní nastavení profilu SnBi	40
Obr. 22 Výsledek měření profilu po první změně	41
Obr. 23 Finální pájecí profil pro SnBi pastu.....	42
Obr. 24 Rozdíly mezi nastavenou a reálnou teplotou v přetavovací peci.....	43
Obr. 25 Vzhled pájeného spoje mezi diodou a deskou	46
Obr. 26 Pájený spoj mezi diodou a deskou – větší void	46

Obr. 27 Pájený spoj mezi diodou a deskou – větší plocha zaujímaná voidy	46
Obr. 28 Pájený spoj s upraveným SAC profilem – jeden rozsáhlý void	47
Obr. 29 Void podobného rozsahu jako předchozí, rozdělený na dva menší	48
Obr. 30 Několik menších voidů – problematické umístění u okraje	48
Obr. 31 LED zapájená pomocí SnBi pasty – vidíme větší množství menších voidů a kuličky pájky v okolí spojů.....	49
Obr. 32 Jeden větší void a řada menších	49
Obr. 33 Menší voidy	50
Obr. 34 Održena vrchní část diody	52
Obr. 35 Spoj a vnitřek diody na desce po odstranění	52
Obr. 36 Oddálený mikrovýbrus – můžeme vidět voidy.....	54
Obr. 37 Mikrovýbrus po dalším leštění – vytvořená prasklina – vzorek SAC	54
Obr. 38 SAC pájka – intermetalická vrstva kolísá od 1 do 6 μm	55
Obr. 39 SAC pasta – intermetalická vrstva se tvoří pouze na jedné straně spoje, na druhé vidíme mikrovoidy	55
Obr. 40 SAC – aplikace mikroleptu – zvýraznění IMC vrstvy	56
Obr. 41 SnBi pájka – intermetalická vrstva na obou stranách spoje – 1,32 a 0,75 μm ..	56
Obr. 42 Druhý vzorek SnBi pájky – aplikace mikroleptu	57
Obr. 43 Umístění mikrovýbrusů v komoře elektronového mikroskopu Scios 2	61
Obr. 44 Snímek z elektronového mikroskopu – tloušťka intermetalické vrstvy SAC pájky 1. generace – snímek získán za pomoci Ing. Pavla Čudka	63
Obr. 45 Snímek z el. mikroskopu 10 000x zvětšeno – SAC pájka 2. generace – kontakt s deskou	64
Obr. 46 Snímek z el. mikroskopu 10 000x zvětšeno – SAC pájka 2. generace – kontakt s LED	64
Obr. 47 Snímek z el. mikroskopu 10 000x zvětšeno – SAC pájka 2. generace – kontakt s deskou – vzorek 2	65
Obr. 48 Snímek z el. mikroskopu 10 000x zvětšeno – SAC pájka 2. generace – kontakt s LED – vzorek 2.....	66
Obr. 49 Pohled na celý spoj SnBi o šířce 45,5 μm	67
Obr. 50 IMC vrstva SnBi pájky – rozhraní s LED – vzorek 1	67
Obr. 51 IMC vrstva SnBi pájky na rozhraní s deskou – vzorek 1	68

Obr. 52 IMC vrstva SnBi pájky – rozhraní s LED – vzorek 2	68
Obr. 53 IMC vrstva SnBi pájky na rozhraní s deskou – vzorek 2	69
Obr. 54 Topografie voidů SnBi pájky, pořízeno detektorem sekundárních elektronů ...	69
Obr. 55 Průběh teploty na LED panelu během experimentu	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Pájecí slitiny s teplotou tavení pod 180 °C [1]	19
Tabulka 2: Pájecí slitiny s teplotou tavení mezi 180–200 °C [1]	19
Tabulka 3: Pájecí slitiny s teplotou tavení mezi 200–230 °C [1]	20

SEZNAM ZKRATEK

- BGA – Ball Grid Array – typ pouzdra integrovaného obvodu
- ENIG – Electroless nickel immersion gold
- FEG – Field Emmission Gun – zdroj elektronů
- FR4 – Flame Retardant 4 – substrát pro výrobu desek plošných spojů
- Hi/LowVac – Označení stupně vakua – Low stovky Pa, Hi 10^{-3} – 10^{-9} Pa
- IMC – Intermetallic Compound – intermetalická vrstva
- IPC – Institut for Printed Circuits
- IR – Infrared – infračervené záření
- LED – Light Emitting Diode – světlo emitující dioda
- MTTF – Mean Time To Failure – střední doba do poruchy
- OSP – Organic Surface Protection
- RoHS – Restriction of Hazardous Substances
- SAC – Sn-Ag-Cu – Složení pájecí slitiny
- SDB – Small Dual Beam – typ elektronového mikroskopu s iontovým zdrojem
- SEM – Scanning Electron Microscopy – rastrovací elektronová mikroskopie
- SMD – Surface Mount Device
- TEM – Transmission Electron Microscopy – transmisní elektronová mikroskopie
- VOC – Volatile Organic Compound – organická těkavá látka

OBRAZOVÁ PŘÍLOHA

Veškeré obrazové materiály, které nejsou uvedeny přímo v práci, jsou vzhledem k rozsahu uloženy na příloženém DVD.